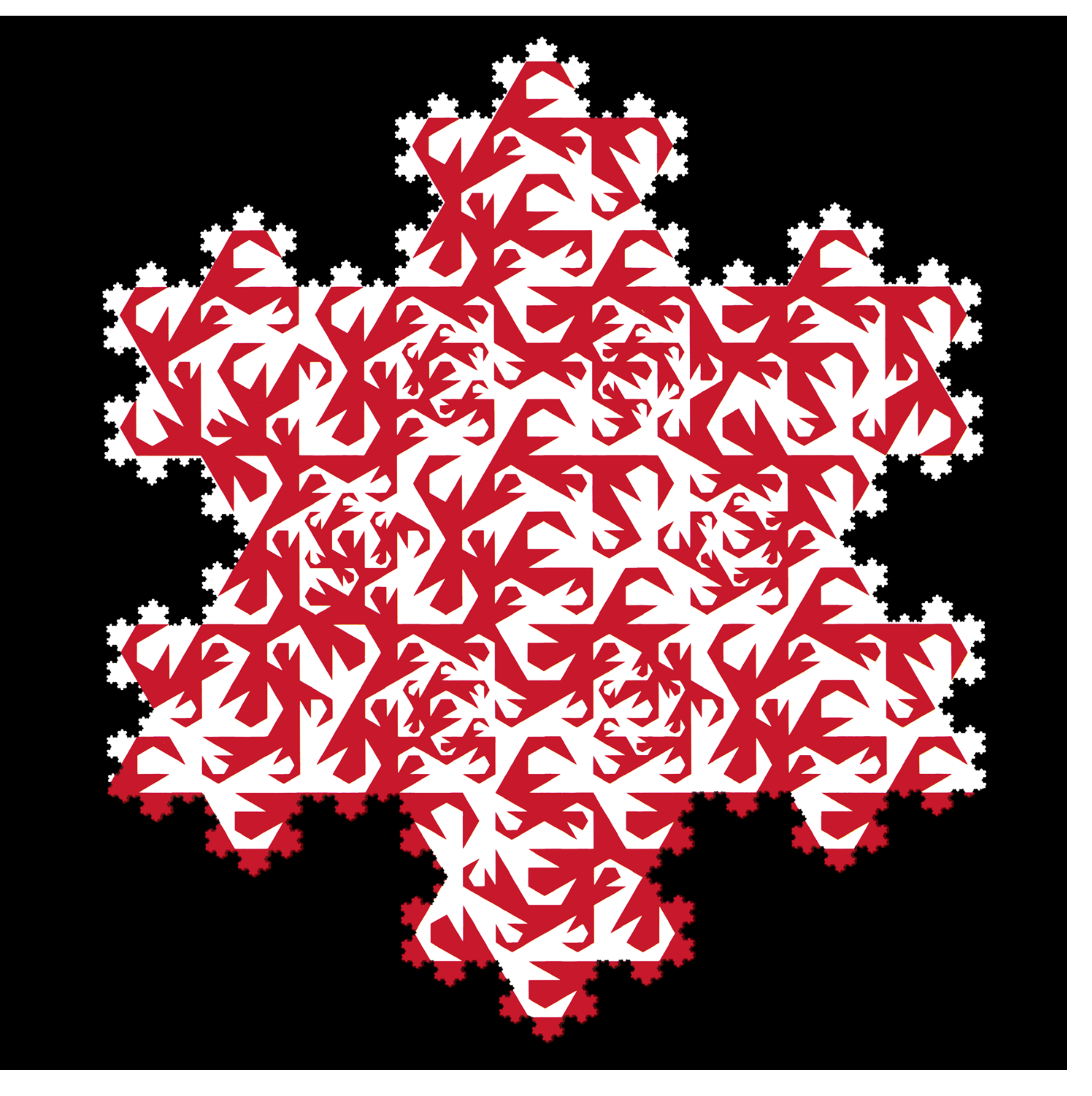
# INVESTIGACION Y CIENCIA

*Edición en español de* SCIENTIFIC AMERICAN



CURVAS FRACTALES

*Junio 1978*

170 PTAS.

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

*Número 21*
*Junio 1978*

INVESTIGACION Y
# CIENCIA
*Edición en español de* SCIENTIFIC AMERICAN





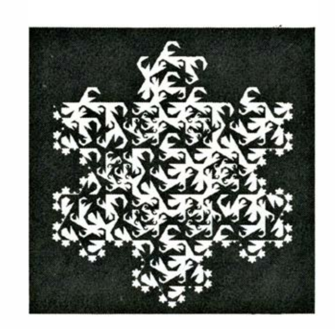
EDITA Prensa Científica, S.A.
Calabria, 235-239
Barcelona-29
ESPAÑA

**Colaboradores de este número:**

*Asesoramiento y traducción:*

José Luis Somalo: *Energía nuclear, armas atómicas y estabilidad internacional;* Francisco Navarro: *Cirugía microvascular en el ictus cerebral;* Monique Robert: *La estela de células en movimiento;* Joandomènec Ros: *Cómo compartían su alimento los homínidos protohumanos;* Ramón Canal: *El nacimiento de estrellas de gran masa;* Miquel Gich: *Chimeneas de kimberlita;* Oleguer Escolá: *Los insectos de la superficie del agua;* Luis Bou: *Juegos matemáticos;* José E. Myro y Alicia Menéndez: *Taller y laboratorio;* Gerardo Espinosa: *Ciencia y sociedad.*

*Libros:*
Philip Morrison



## LA PORTADA

La ilustración de la portada enlaza dos curvas con notables propiedades matemáticas (véase la sección "Juegos matemáticos"). La curva en copo de nieve que separa la región obscura exterior del motivo central fue descubierta en 1904 por el matemático sueco Helge von Koch. La propiedad más llamativa del copo de nieve es que se trata de una curva infinita que limita un área finita. La frontera entre las regiones blanca y roja es la tercera etapa de la construcción de una curva descubierta recientemente por el matemático Benoît Mandelbrot. Se publica aquí por primera vez. En el límite esta curva llenará completamente la región definida por el copo de nieve. Tanto la curva copo de nieve como la curva Mandelbrot son autosemejantes: si se aumenta una parte de una, la parte alargada muestra el dibujo de la curva. Mandelbrot les asigna dimensiones fraccionales y las ha denominado curvas fractales.


*Suscripciones:*

Prensa Científica, S.A.
Departamento de suscripciones
Calabria 235-239
Barcelona-29 (España)
Teléfono 322 05 51 ext. 41

*Distribución para España:*

Distribuciones de Enlace, S.A.
Ausias March, 49
Barcelona-10 (España)

*Distribución para los restantes países:*

Editorial Labor, S.A.
Calabria, 235-239
Barcelona-29 (España)

*Precio de venta de este número:*

España: 170 pesetas
Extranjero: 2 U.S. $

*Condiciones de suscripción:*

España:
Un año (12 números): 1870 pesetas
Extranjero:
Un año (12 números): 30 U.S. $

Ejemplar atrasado ordinario:
190 pesetas

Ejemplar atrasado extraordinario:
270 pesetas.

Difusión controlada por **OJD**


## PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

La portada es cortesía de Benoît Mandelbrot

| Página | Fuente |
|---|---|
| 6-19 | Jerome Kuhl |
| 22-26 | Guenter Albrecht-Buehler |
| 27 | Alan D. Iselin (*arriba*), Guenter Albrecht-Buehler (*abajo*) |
| 28 | *Cell.* © The MIT Press (*arriba izquierda*); Alan D. Iselin (*arriba, derecha*); Guenter Albrecht-Buehler (*abajo*) |
| 29 | Guenter Albrecht-Buehler (*arriba*), Alan D. Iselin (*abajo*) |
| 30-31 | Guenter Albrecht-Buehler |
| 33 | Bruce Coleman Incorporated |
| 34-38 | Tom Prentiss |
| 43 | National Geographic Society-Palomar Observatory Sky Survey |
| 44-46 | George V. Kelvin |
| 47 | National Geographic Society–Palomar Observatory Sky Survey |
| 48 | Kitt Peak National Observatory |
| 49 | George V. Kelvin |
| 50 | Centro Astronómico Hispano-Alemán Almería |

| Página | Fuente |
|---|---|
| 53 | Lorelle M. Raboni |
| 54 | Toshisada Nishida |
| 55-57 | Lorelle M. Raboni |
| 58 | Lorelle M. Raboni |
| 59 | Glynn Isaac |
| 60-65 | Lorelle M. Raboni |
| 68-69 | James Young |
| 70-73 | Carol Donner |
| 74 | James Young |
| 75 | Allen Beechel |
| 76-77 | Jack M. Fein |
| 81 | De Beers Consolidated Mines Limited |
| 82 | Keith G. Cox |
| 83-88 | Adolph E. Brotman |
| 89 | Keith G. Cox |
| 90 | Adolph E. Brotman |
| 92-93 | Raimundo Goberna |
| 94-101 | Raimundo Goberna y A. Sellés |
| 105 | Ilil Arbel (*arriba*), W. H. Freeman and Company (*abajo*) |
| 106-110 | Richard F. Voss |
| 114 | Michael Goodman |
| 115 | Fritz Goro |
| 116-119 | Michael Goodman |


Dep. legal: B. 38.999-76
Fotocomposición: Fort, S.A.
Rosellón, 33 - Barcelona-29
Cayfosa. Santa Perpetua de Moguda. Barcelona.

Printed in Spain - Impreso en España

# Los autores

DAVID J. ROSE y RICHARD K. LESTER ("Energía nuclear, armas atómicas y estabilidad internacional") comparten su interés por los problemas de la seguridad en relación con el abastecimiento internacional del combustible nuclear. Rose es profesor de ingeniería nuclear en el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT). Nacido en Canadá, en 1950 se graduó en ingeniería física por la Universidad de Columbia Británica, doctorándose en física por el MIT. Después de permanecer siete años en los laboratorios Bell entró en el claustro del MIT en 1958. Desde entonces, sus investigaciones han abarcado temas como la dinámica del plasma, la fusión nuclear controlada y la política energética nacional. De 1969 a 1971 Rose ostentó el cargo de director de planificación a largo plazo del laboratorio nacional de Oak Ridge, y actualmente es miembro de la comisión de la Academia Nacional de Ciencias encargada del estudio de los sistemas energéticos nucleares y alternativos. Lester es investigador asociado en la Fundación Rockefeller. Nacido en Inglaterra, se graduó en ingeniería química por el Colegio Imperial de Ciencias y Tecnología en 1974, pasando a continuación al MIT en su departamento de ingeniería nuclear. Juntamente con Mason Willrich, acaba de publicar el libro *Radioactive Waste: Management and Regulation.*

GUENTER ALBRECHT-BUEHLER ("La estela de células en movimiento") dirige la sección de biología celular del laboratorio de Cold Spring Harbor, sito en Long Island. Nació en Berlín y realizó estudios de física en la Universidad Técnica de Munich. Estuvo trabajando durante tres años sobre las propiedades físicas de las membranas estimulables, en el laboratorio de H. Mueller-Mohnssen. Prosiguió sus estudios en la escuela superior de Munich, doctorándose en física en 1971 con una tesis sobre la aplicación de la óptica al estudio de las membranas celulares. Tras una estancia de tres años en el Instituto Friedrich Miescher de Basilea, estudiando la motilidad celular, consiguió una beca en la Universidad de Florida en Gainesville. En 1974, se le invitó al laboratorio de Cold Spring Harbor para que se encargara del funcionamiento del nuevo microscopio electrónico de barrido.

LORUS J. MILNE y MARGERY MILNE ("Los insectos de la superficie del agua") son ecólogos y etólogos de la Universidad de New Hampshire. Se doctoraron en biología en la Universidad de Harvard y en el Radcliffe College, respectivamente. Se han interesado últimamente por el estudio de la película superficial de lagos y corrientes de agua, hábitat de toda una serie de formas de insectos que muestran una adaptación excepcional al mismo.

MICHAEL ZEILIK ("El nacimiento de estrellas de gran masa") da clases de astronomía en la Universidad de New Mexico. Se graduó en física por la Universidad de Princeton y en astronomía por la de Harvard, en 1969. Tras enseñar durante tres años en el Southern Connecticut State College, prosiguió su estudio de la astronomía en el centro de astrofísica del Harvard College Observatory y en el Smithsonian Astrophysical Observatory donde se doctoró en 1975. Zeilik investiga la formación de estrellas a través de observaciones en las longitudes de onda radio e infrarrojas, a fin de descubrir regiones de nacimientos estelares recientes en nuestra galaxia.

GLYNN ISAAC ("Cómo compartían su alimento los homínidos protohumanos") es profesor de antropología en la Universidad de California en Berkeley, donde enseña arqueología y evolución humana. Nacido en Sudáfrica, estudió zoología y geología en la Universidad de Ciudad de El Cabo y después asistió a la Universidad de Cambridge, doctorándose en arqueología en 1968. Las etapas finales de la investigación que explica en su artículo fueron subvencionadas por una beca Guggenheim y una beca de viaje a Peterhouse, Cambridge, en 1976. Escribe: "Desde los 12 años me ha interesado el estudio de la prehistoria considerada como el punto de contacto entre la historia y la historia natural, y he deseado utilizar la arqueología para ampliar nuestra comprensión de la evolución del hombre. De manera que cuando, en 1961, Louis Leakey nos ofreció a mi esposa Barbara y a mí la posibilidad de participar en el estudio que se estaba realizando en Africa oriental, no dudamos ni un momento. Desde 1970 hemos estado ligados a Richard Leakey en el cuidadoso estudio a largo plazo de uno de los principales almacenes de pruebas sobre el modo de vida del hombre primitivo."

JACK M. FEIN ("Cirugía microvascular en el ictus cerebral") trabaja como neurocirujano en el Albert Einstein College Hospital, de Nueva York, y es profesor asistente de neurocirugía de la facultad adscrita a dicho centro. Estudió en la Universidad de Yeshiva y en la de Nueva York, en donde se licenció en el año 1965. Después de su internado y residencia en el Kings County Hospital y el Medical Center de Brooklyn, se dedicó a investigar la circulación arterial del cerebro en la Universidad de Nueva York y en el National Naval Medical Center. Trabajó como jefe de la división de ciencias neurológicas del Instituto de Investigación Radiobiológica de las Fuerzas Armadas.

KEITH G. COX ("Chimeneas de kimberlita") enseña en el departamento de geología y mineralogía de la Universidad de Oxford. Tras obtener su licenciatura, hizo cursos de investigación en el Research Institute of African Geology de la Universidad de Leeds. Su interés por la geología de las rocas ígneas le llevó a realizar trabajos de campo en la provincia volcánica de Karroo (Africa del Sur). El mismo escribe: "Durante estos estudios visité Lesoto para observar los basaltos de Karroo. Una vez allí, y de forma puramente accidental, un prospector de diamantes local me llevó a la chimenea de kimberlita de Matsoku, desconocida para la ciencia hasta entonces. Así emprendí el estudio de las kimberlitas como un 'hobby' científico, que, complementaba mi interés primordial sobre las rocas basálticas, y en 1963 dirigí una expedición a Matsoku".

RAIMUNDO GOBERNA ("¿Cómo se segrega la insulina?") es catedrático de bioquímica de la Facultad de Medicina de la Universidad de Sevilla. De 1967 a 1971 trabajó en el departamento de investigaciones básicas de la Universidad de Ulm (República Federal de Alemania). Ha sido becario de la Fundación Humboldt y del Ministerio de Educación y Ciencia. De 1971 a 1975 fue adjunto y profesor agregado de fisiología y bioquímica en la Facultad de Medicina de la Universidad Complutense. Su línea de investigación actual está centrada en las modificaciones metabólicas durante el ayuno prolongado y, en especial, en la secreción y mecanismo de acción de la insulina.

# Energía nuclear, armas atómicas y estabilidad internacional

*La indecisión sobre su política energética interior y sobre el papel de la energía nuclear pueden hacer fracasar los actuales esfuerzos de los Estados Unidos para controlar la proliferación de armas atómicas*

David J. Rose y Richard K. Lester

Este mes hace una año que la Administración Carter presentó ante el Congreso un coherente plan nacional de energía que incluía, como uno de sus componentes clave, una revisión de la política de largo alcance de su país en lo referente al desarrollo de la energía nuclear aplicada a fines civiles. El cambio propuesto, que tendría la consecuencia de reducir ciertos aspectos del programa de energía nuclear norteamericano y llevar a cabo nuevas restricciones en la exportación de materiales nucleares, de equipo y de servicios, se basaba explícitamente en la suposición de que existe una auténtica relación entre la extensión a nivel mundial de las plantas de energía nuclear y su correspondiente tecnología por un lado y la proliferación de armas nucleares y el consecuente riesgo de guerra nuclear por el otro. Este punto de vista se ha convertido en el tema central de un vivo debate. En uno de los extremos de opinión, algunos creen descubrir a la guerra nuclear acechando detrás de cada reactor atómico instalado en países extranjeros, mientras que otros, en cambio, sostienen que la relación entre la energía nuclear civil y la proliferación de armas nucleares resulta irrelevante.

Vamos a adelantar aquí la herética afirmación de que la supuesta relación pueda seguir otra dirección y que las recientes acciones y declaraciones del gobierno de los Estados Unidos hayan tomado muy poco en consideración esta posibilidad. En pocas palabras, nos parece que si los Estados Unidos fuesen a renunciar a la opción de aumentar sus ofertas de energía nuclear, la escasez global de recursos energéticos disponibles forzaría a los demás países a elegir incluso con más fuerza la energía atómica y a llevar a la práctica esta elección por procedimientos que pondrían quizás en peligro la estabilidad internacional. De esta forma, unas decisiones adoptadas con la firme intención de fortalecer la seguridad mundial acabarían finalmente por debilitarla. Creemos, por otra parte, que cualquier orientación política que adopte como objetivo el dividir el mundo en dos grandes grupos de naciones –"nucleares" y "no nucleares"–, tratando de poner bajo llave la tecnología nuclear, no puede llegar nunca a conseguir una sociedad mundial justa ni estable, sino más bien todo lo contrario. Y en cualquier caso, la tecnología en sí misma no podría nunca permanecer encerrada bajo llave con eficacia y seguridad. Consideramos que los peligros de proliferación nuclear pueden eliminarse únicamente construyendo una sociedad que no encuentre ventajoso situar las armas nucleares en el primer lugar, en el lugar preferente entre sus objetivos a alcanzar. De acuerdo con esto, vislumbramos el problema de la proliferación de armas nucleares como un asunto ciertamente muy importante, pero no precisamente dentro de los límites del tema de la energía atómica, sino dentro de una dimensión mayor.

En el seno de la política de los Estados Unidos existen considerables tensiones y un básico antagonismo entre los objetivos energéticos y los de no proliferación, y, en un nivel diferente, entre las respectivas consecuencias de las medidas desarrolladas para conseguir los correspondientes objetivos primarios, tanto en el plano nacional como en el internacional. En el resto de este artículo vamos a analizar el complejo conjunto de factores, relacionados entre sí, que influyen globalmente en el tema de la energía nuclear y la seguridad mundial.

La más importante de las nuevas decisiones adoptadas por la Administración en abril de 1977 fue anunciar que los Estados Unidos, por un lado, aplazarían indefinidamente el reprocesado del combustible nuclear consumido en las plantas de energía atómica del país, que tiene por objeto recuperar y reciclar el plutonio y el uranio fisionable no utilizado, y que por otro lado intentarían persuadir a las demás naciones para que siguiesen el mismo camino. La legislación remitida al Congreso ponía de manifiesto la intención de la Administración de restringir las exportaciones relacionadas con el ciclo del combustible nuclear e impedir que la tecnología nuclear, exportada por los Estados Unidos, acabase en poder de terceros países. (Desde entonces, el Congreso ha aprobado una versión modificada del proyecto de ley sobre no proliferación confeccionado por la Administración.) De acuerdo con estas restricciones, la capacidad norteamericana de enriquecer el uranio hasta alcanzar niveles adecuados para su empleo en reactores convencionales de agua ligera (por oposición a "agua pesada") iba a verse incrementada para ayudar a satisfacer la creciente demanda mundial en este tipo de servicios.

En el orden interno del país, los requisitos necesarios para la aprobación de instalaciones de reactores de agua ligera iban a ser mucho más severos en lo sucesivo. La Administración propuso también una importante desaceleración en el programa norteamericano dirigido al desarrollo de un reactor nodriza, de rápida refrigeración por metal fundido, un tipo de planta de energía nuclear orientado a fabricar y consumir plutonio fisionable, independientemente de las grandes reservas de uranio ordinario, no fisionable, existentes en la corteza terrestre. Concretamente, el reactor no-

driza Clinch River, pendiente de ser construido en Tennessee, con un costo aproximado de 2000 millones de dólares, fue incluido entre los propuestos para cancelación. El funcionamiento de los reactores nodriza requiere el reprocesado periódico de combustible nuclear, de suerte que el nuevo tratamiento a partir del reprocesado del combustible y el énfasis del desarrollo del reactor nodriza se complementan mutuamente. (Por desgracia, el reactor Clinch River se ha convertido en el punto clave dentro del debate que enfrenta a los interlocutores que se oponen y a los que están a favor de la energía nuclear. La situación se ha hecho doblemente desafortunada, ya que, por una parte, dicho programa era vulnerable técnica e institucionalmente y, por otra, la cancelación del mismo no ha conseguido influir de modo favorable en la resolución de los problemas, cada vez más profundos, que se discuten.)

Los Estados Unidos iban también a introducir modificaciones en los programas de investigación y desarrollo nucleares para poner un mayor énfasis en el logro de otros tipos de tratamiento del combustible y en proyectar unos modelos de reactor que pudiesen ofrecer unas posibilidades restringidas de acceso a aquellos materiales que fueran aptos para su empleo en la fabricación de armas nucleares. Esta iniciativa se ha llevado a nivel mundial mediante la creación de un programa internacional para valorar y evaluar procesos diferentes, técnicos e institucionales, en los tratamientos del combustible atómico.

A lo largo de los meses transcurridos desde que la Administración anunció su programa, éste ha provocado una fuerte polémica, no sólo en el interior de los Estados Unidos, sino también a nivel mundial. Ha dejado insatisfechos no sólo a los que se oponían, sino también a aquellos que estaban a favor del programa de energía nuclear norteamericano y también (en parte por la forma en que ha sido presentado) ha provocado inquietud en muchas capitales extranjeras. Algunas de las naciones asociadas a este país en el desarrollo de la energía nuclear consideran que no han sido consultadas suficientemente durante la gestación de la nueva política y que las explicaciones que al fin han recibido sobre la misma han sido, al menos al principio, torpes y poco satisfactorias. Sin embargo, por debajo de esta sorda irritación yace una profunda ansiedad que le sirve de base, al comprobar que el combustible enriquecido en los Estados Unidos, así como los reactores construidos por compañías norteamericanas, desempeñan aun un papel significativamente importante en muchos programas nacionales de energía nuclear, y los efectos y consecuencias de la política nuclear estadounidense se dejan sentir por doquier.

¿Cuáles han sido los verdaderos motivos, ocultos tras la nueva política nuclear de la Administración y las medidas del Congreso en relación con la misma? Algunas posibles respuestas a esta pregunta nos vienen a la mente. La primera consiste en pensar que la Administración quiera decir precisamente lo que dice, es decir, que su intención sea fortalecer la estabilidad internacional, llevando a cabo acciones encaminadas a detener la proliferación de armas nucleares. Esto podría lograrse poniendo trabas a todo lo que pudiese facilitar el acceso a aquellas materias nucleares –y su correspondiente tecnología– que resultan necesarias para el desarrollo de un programa de armamento, incluso en el caso de que estas mismas materias y tecnología hayan formado parte hasta ahora de los procesos para el desarrollo de los programas de energía con fines civiles.

Otra posible respuesta a la anterior pregunta consiste en que, tanto la Administración como el Congreso, duden ante la encrucijada que representa el decidir si resulta o no deseable provocar un colapso en la industria nuclear norteamericana. Esta presunta indecisión estaría de acuerdo con la aparente incapacidad del Gobierno para la formulación de una estrategia coherente en el plano de la energía nuclear.

Resulta igualmente posible que la Administración haya anunciado su política como una respuesta conciliatoria ante las críticas de que está siendo objeto sobre la energía nuclear, pero que esperase, no obstante, que esta política no diese resultado y que, tras esta demostración de buena fe, se sacase a la luz un nuevo programa, más pragmático, en el momento oportuno. Un posible peligro ante semejante táctica surgiría en el caso de que la Administración retrasase demasiado su prevista denuncia del programa. La reacción norteamericana ante una Administración que presentase una imagen de conformismo ante la supresión de la energía nuclear en su país, o incluso a la que se viese activa y francamente tomando partido a favor de dicha supresión, podría adquirir un impulso y unas consecuencias irreversibles.

Puede también suceder que la Administración, frustrada ante la rigidez diplomática presente en las discusiones a nivel mundial sobre seguridad internacional y sobre limitaciones de armamentos, esté orientándose hacia nuevos planteamientos. Pero estos nuevos planteamientos es preciso definirlos; confiamos en que este artículo pueda dar alguna luz sobre el tema. Las cuatro posibles causas generales de la actual política norteamericana que acabamos de ver, no son independientes unas de otras y el Gobierno podría variar la prioridad entre las mismas como consecuencia del desarrollo de los acontecimientos.

Diversas circunstancias constituyen el entramado o la situación general sobre la que la Administración ha formulado su programa nacional de energía y sobre la que va a tratar de alcanzar la totalidad de los objetivos energéticos y de no proliferación nuclear. La primera de ellas ha sido la urgente necesidad de reducir el derroche creciente de capitales norteamericanos –que ascienden actualmente a más de 40.000 millones de dólares anuales–, empleados en el pago de las importaciones de petróleo. Tal gasto, aunque no se considere que pueda llevar a la bancarrota al país, hubiera resultado inconcebible tan sólo en 1973. Más aún, esta situación ha hecho aparecer a Norteamérica dependiendo –excesivamente en cierto modo– de la política de los principales países exportadores de crudos. La dependencia cada vez mayor de esta clase de importaciones ha sido (y es) vista, con seguridad, como la causa principal del problema energético de los Estados Unidos.

La segunda circunstancia ha sido la existencia de enormes reservas carboníferas nacionales, equivalentes a quizá diez veces la totalidad de los recursos petrolíferos y de gas natural del país. Unicamente el 19 por ciento de la producción energética estadounidense procede de los 650 millones de toneladas anuales de carbón que se vienen extrayendo últimamente. Los cálculos sobre las cantidades de carbón existentes en el país en condiciones de explotación a los precios actuales y con el empleo de la presente tecnología, ofrecen cifras que oscilan entre los 200.000 y 600.000 millones de toneladas; por tanto, aún en el caso de que la producción carbonífera se triplicase, las estimaciones mínimas alcanzan los 100 años de recursos disponibles. Por otra parte, las existencias totales de carbón en los Estados Unidos podrían llegar hasta los 3 billones de toneladas aptas para una explotación a la larga a unos costes incrementados –una cuarta parte de las reservas mundiales conocidas. Además del carbón existen otros recursos energéticos, quizás equivalentes a 1 billón de toneladas de car-

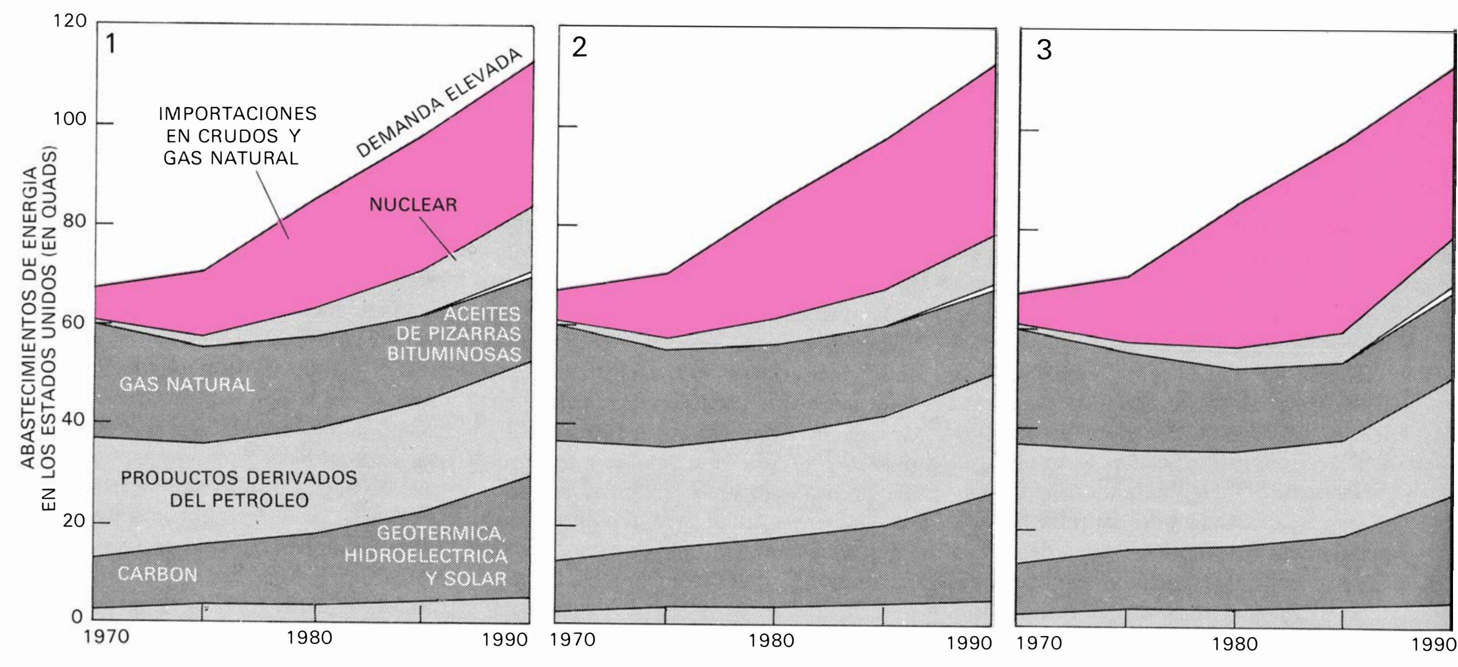
bón, en los depósitos de aceites de pizarra bituminosa localizados en la zona noroeste de Colorado. Se cree que los avances de la técnica permitirían disponer de muchos de estos recursos, casi con toda seguridad, en un plazo relativamente corto. Si esta afirmación no se toma en sentido literal y absoluto, podría decirse que Norteamérica se está "quedando sin energía". De esta forma surgió como objetivo el aumentar varias veces la producción carbonífera hacia el año 2000 con respecto a las cifras actuales. De esta forma, los Estados Unidos podrían limitar su actual dependencia de las importaciones petrolíferas y podrían, quizá, permitirse igualmente un programa nuclear más desahogado.

La tercera circunstancia ha sido la toma en consideración, por primera vez seriamente, del tema de la conservación de la energía. Los muchos estudios realizados entre 1975 y 1977 han demostrado que no solamente es posible un sustancial aumento de la eficacia energética, sino también que se está derrochando demasiada energía. Durante la gestión de las últimas Administraciones, el tema de la importancia de la conservación de la energía fue admitido y reconocido en todo su alcance, pero recibió muy poco apoyo real; el Congreso tampoco se mostró demasiado activo a este respecto, a la vista de sus posibilidades reales.

En oposición a la referida conservación se han reunido diversos argumentos, de los cuales el principal es el hacer ver la estrecha relación existente entre la actividad económica y el empleo de la energía; de aquí que el uso restringido de la energía pudiese acelerar una posible recesión, e incluso provocarla. En términos generales, la energía y la actividad económica están íntimamente ligados, ya que las máquinas consumen energía y las máquinas no pueden reemplazarse de la noche a la mañana. Si se sustituyese un mayor número de máquinas de alto consumo de energía durante la fase final de su vida, por otras de bajo consumo energético, la demanda de energía podría quedar rebajada dentro de algunos decenios del 1 al 2 por ciento anual con respecto a la demanda prevista. Con una tasa de crecimiento económico del 3 al 4 por ciento anual, las necesidades energéticas podrían aumentar entonces únicamente la mitad de dicha tasa; hacia el año 2000 se habría triplicado el Producto Nacional Bruto y, por el contrario, la energía consumida por unidad de rendimiento económico se habría rebajado hasta alcanzar alrededor del 60 por ciento de su valor actual. Incluso de esta forma, el consumo de energía interior habría crecido aproximadamente el 1,6 por ciento, a través de una activa explotación de los recursos carboníferos, de la energía solar, de los reactores de agua ligera y quizá de otras técnicas. (Las anteriores cifras son solamente un ejemplo de la variedad de conclusiones a que pueden llegar los técnicos en la planificación energética.)

La cuarta circunstancia trata de algunos aspectos de la energía nuclear en sí misma. En primer lugar, la capacidad industrial de los Estados Unidos para crear reactores de agua ligera es grande, quizá demasiado grande. Resultaría necesaria una parte importante de esta capacidad para su empleo en la construcción y montaje de algunas de las centrales generadoras de electricidad con carga base, reservando el carbón para su empleo en otras plantas eléctricas y para otros usos. En segundo lugar, la industria accionada por energía nuclear, acosada por las críticas procedentes de diversos sectores de opinión y por una Comisión Reguladora Nuclear que venía apareciendo cada vez más exigente, necesitaba también de algún alivio en su organización. Así surgió como objetivo la simplificación en los procedimientos para la obtención de licencias de instalación y en otros requisitos burocráticos. La industria de los reactores de agua ligera iba a adquirir un impulso superior merced a estas actividades y las empresas eléctricas serían orientadas en la "dirección nuclear", construyendo reactores de agua ligera dondequiera que tales plantas fuesen económicamente atractivas.

La quinta circunstancia se refiere a los recursos de uranio –en especial en los Es-

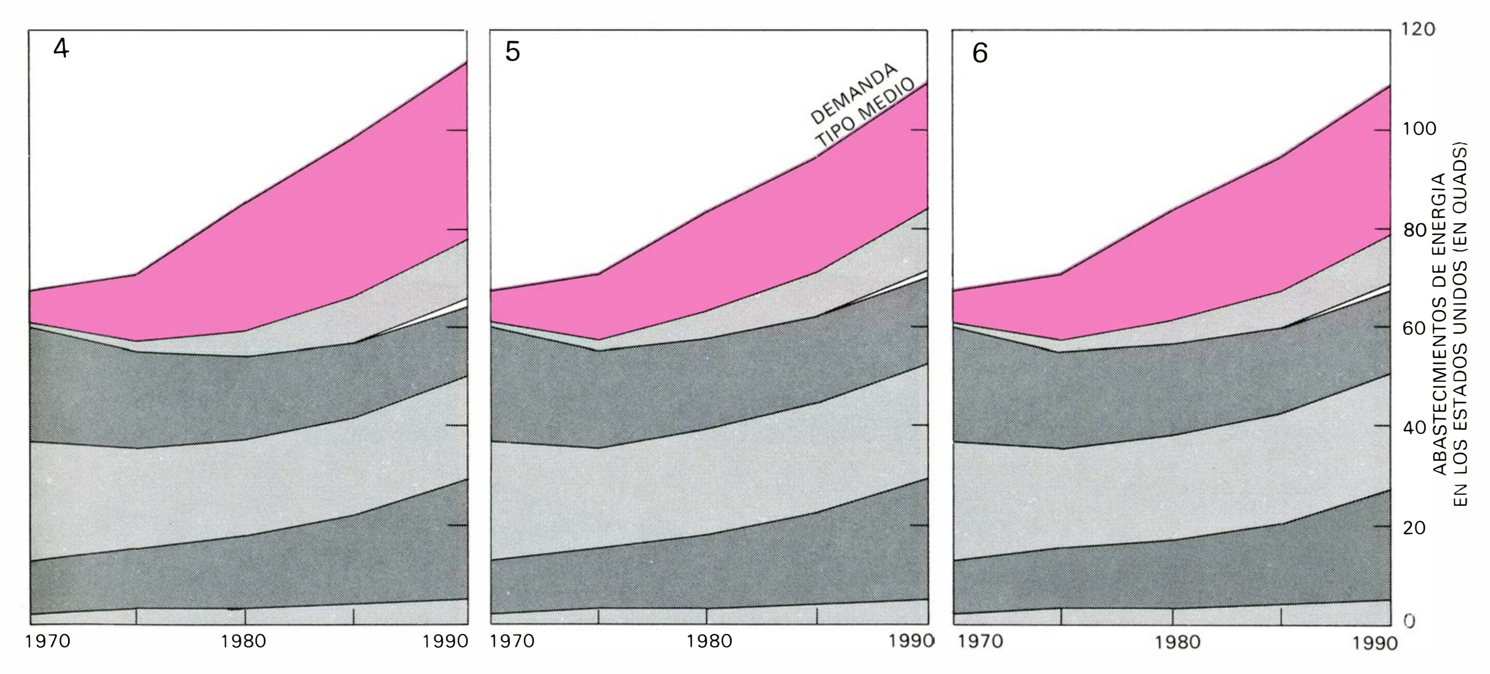



**PROYECTOS ENERGETICOS ALTERNATIVOS de los Estados Unidos hasta 1990. Los gráficos, que continúan en las páginas siguientes, representan 12 posibles y diferentes situaciones-tipo en relación con el tema de la oferta y la demanda energéticas. Estos gráficos han sido confeccionados por personal especializado del Servicio de Investigación del Congreso norteamericano, basándose en hipótesis diferentes acerca de las tasas de crecimiento económico, precios energéticos, elasticidad de la demanda de energía, así como influencias varias sobre los diversos tipos de abastecimiento de energía. Las tablas que han proporcionado los datos para la confección de los gráficos fueron elaboradas a lo largo de un estudio de dos años de duración llevado a cabo por orden de varios comités del Congreso, responsables de la intervención en asuntos relacionados con la energía: los datos aparecieron inicialmente en** ***Project Interdependence: U.S. and World Energy Outlook***

tados Unidos–, necesarios para la alimentación de todos estos reactores de agua ligera. Cada reactor, con una potencia de producción de 1000 megavatios de energía eléctrica, necesita aproximadamente 5500 toneladas de uranio (en forma de óxido de uranio) para un período previsto de funcionamiento de unos 30 años. La Administración conocía la existencia en el país de unos depósitos equivalentes a unas 680.000 toneladas de óxido de uranio, de unas características que harían posible su explotación económica empleando la actual tecnología; además se dispondría de otras 140.000 toneladas en el período comprendido entre el momento actual y finales de siglo, como un subproducto de otras operaciones de extracción mineral. Llegó también a la conclusión de que, en números redondos, podría disponerse de otros tres millones de toneladas en el momento oportuno y que esta cantidad podría ser explotada a un costo de 50 dólares la libra (aproximadamente 110 dólares el kilogramo), o incluso a un costo menor. Con todo este uranio podrían alimentarse alrededor de 700 reactores durante su ciclo completo de vida previsto, o incluso un número mayor si no se considera la totalidad de la vita útil de cada planta.

Teniendo también presente que las estaciones de energía nuclear emplean 10 o más años en su construcción y que las solicitudes de instalación irían aumentando progresivamente, la Administración llegó a la conclusión de que se disponía del suficiente combustible nuclear para cubrir la totalidad de las necesidades a lo largo de varios decenios del próximo siglo. Todo ello podría hacerse sin necesidad de reprocesar el combustible consumido por los reactores. Además de ello, se había demostrado por medio de estudios diversos que el reciclaje del uranio y plutonio, en los tiempos actuales de los reactores de agua ligera, resultaría en el mejor de los casos sólo marginalmente atractivo desde el punto de vista económico y podría en realidad provocar unos costos superiores a los de los tratamientos "de una sola vez".

Esto nos conduce hasta la sexta circunstancia: la preocupación de la Administración ante la relación existente entre las tecnología del reprocesado del carburante atómico y el posible incremento en la capacidad de fabricación de armas nucleares. En los últimos años, ha crecido la duda sobre si las medidas internacionales de control funcionarían satisfactoriamente en una situación de "economía del plutonio", es decir, en una situación en la que a lo largo de diversas fases del ciclo nuclear aparecerían importantes cantidades de plutonio en condiciones de ser extraído sin grandes dificultades. El objetivo de las referidas medidas internacionales de control se basa en poder lograr la detección, ante una posible sustracción o desviación de materiales nucleares por parte de naciones interesadas, con la suficiente anticipación para permitir la puesta en funcionamiento de las previstas contramedidas internacionales orientadas a impedir la transformación de dichos materiales en explosivos ingenios. Se ha argumentado, no obstante, que el plutonio recuperado en virtud de la reprocesión del combustible consumido y reciclado luego, podría convertirse en explosivo tan rápidamente, una vez desviado de su normal destino, que la capacidad de funcionar correctamente el sistema internacional de control resultaría fatalmente inoperante incluso en el caso de que se detectase a tiempo la pérdida de los materiales. Los controles internacionales no pueden lograr impedir una acción de desviación; en el mejor de los casos, únicamente podrán intentar conseguir la disuasión a través de la amenaza que puede representar un descubrimiento de la acción realizada, rápido y oportuno. Si se adoptase el plutonio como combustible comercial tipo, se perdería por completo el efecto disuasorio de los referidos controles. Además, la presencia del plutonio aumentaría los riesgos de terrorismo nuclear y surgirían preguntas sin respuesta en relación con la eficacia y la necesidad de las medidas de seguridad internas que sería preciso introducir para enfrentarse con tales riesgos.




**_Through 1990_ ("Proyecto Interdependence: perspectivas energéticas en los Estados Unidos y resto del mundo hasta 1990"), un informe de 939 páginas publicado en noviembre por la Oficina de Prensa del Gobierno. Las primeras seis situaciones-tipo de la serie que figuran en los gráficos de estas dos páginas presentan las siguientes características: elevada demanda y abundantes recursos en los abastecimientos carboníferas y nucleares _(1)_; elevada demanda y nivel medio en los abastecimientos _(2)_; demanda elevada y bajo nivel medio en los abastecimientos _(3)_; demanda elevada, bajo nivel de abastecimientos en productos petrolíferos y gas natural, pero nivel alto en los abastecimientos carboníferos y nucleares _(4)_; demanda de tipo medio y alto nivel de abastecimientos carboníferos y nucleares _(5)_; demanda de nivel medio y abastecimientos de nivel medio, situación que en el referido estudio es conocida como "caso básico" _(6)_. Todas las cifras figuran en "quads".**

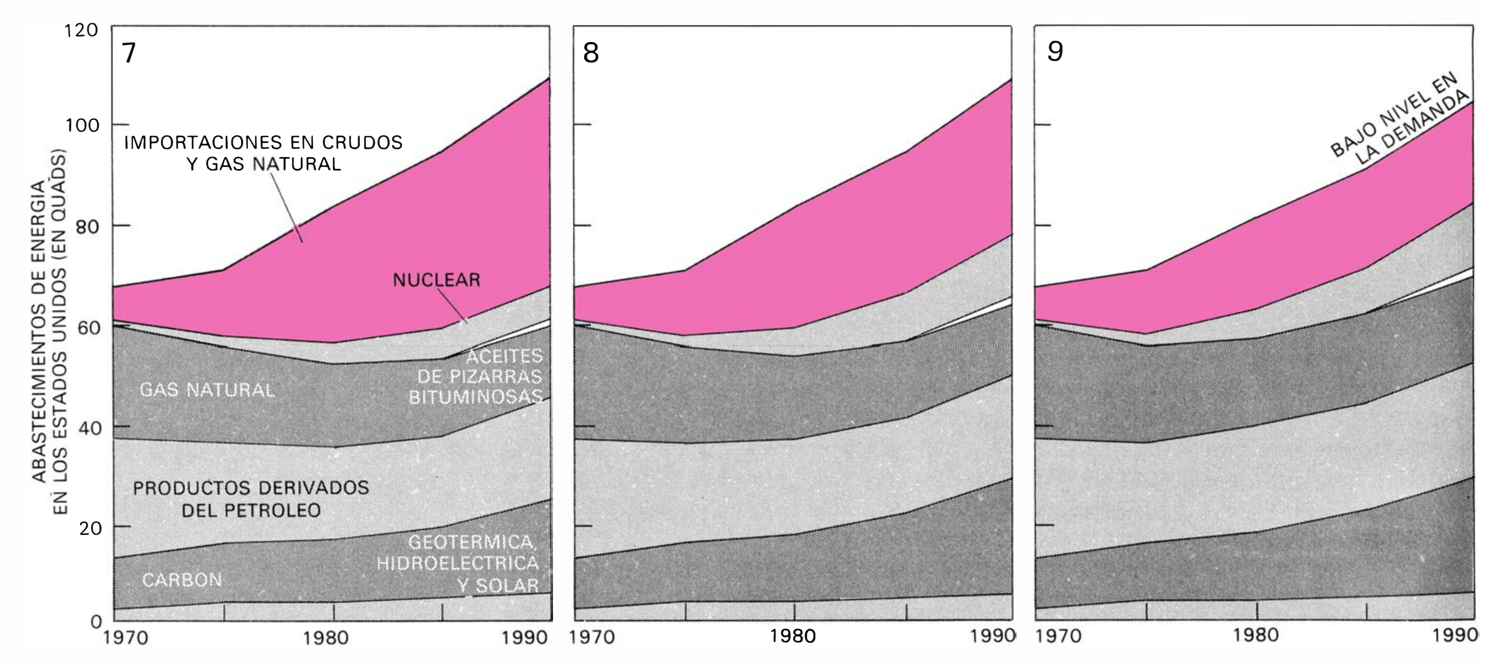
Por otra parte, si no hubiera reprocesado no habría plutonio para su empleo en los reactores nodriza, pero tampoco para su utilización en armas nucleares basadas en este elemento radiactivo; una nación que no reprocesara el combustible de sus reactores de energía nuclear, no podría irse deslizando imperceptiblemente hasta llegar a alcanzar una posición que le permitiese conseguir una capacidad suficiente para poder fabricar armas nucleares y tampoco podría –en el caso de que se dejase tentar por una idea temporal de este tipo– viciar un programa civil de energía atómica. Se vería obligada a elegir entre extraer uranio 235 fisionable, casi puro, del uranio natural, actividad que está ciertamente asociada con las armas nucleares, pero que de ninguna manera lo está con los reactores convencionales de agua ligera o de agua pesada. o bien se vería en la necesidad de aceptar un riesgo al decidirse a reprocesar el combustible ya consumido en sus reactores para lograr la extracción del deseado plutonio. En cualquier caso, se cree firmemente que cualquiera de ambos tipos de actividad descritos se encuentran fuera del alcance de la actual capacidad tecnológica de cualquier grupo subnacional actuando en la clandestinidad.

Si en Norteamérica existía realmente una gran preocupación por la proliferación de armas nucleares a nivel mundial, ¿por qué entonces no detuvieron el proceso de regeneración del combustible atómico en las instalaciones existentes en el país? Parece que la mejor respuesta a esta pregunta sería que, si iban a tener que defender públicamente su posición, lo mejor sería que –por decirlo de alguna forma– llegasen a juicio con las manos limpias.

Para obrar con un grado superior de seguridad, si se vislumbrase alguna perspectiva mejor, como pudieran ser las centrales de energía solar o alguna estación de fusión controlada, podría retrasarse –definitivamente incluso– el proceso de fabricación de los reactores nodriza. Hablando con claridad, estos últimos tipos de opción deberían recibir un fuerte impulso. Mientras tanto, hasta el programa norteamericano nodriza iba a obtener beneficios, ya que daría tiempo para llevar a cabo la exploración de un conjunto más amplio de posibilidades tecnológicas, no sólo en teoría, sino también a través de la realización de experiencias a escala más bien modesta. Lejos de ser cancelado, el programa nodriza ofrecería muchas y diversas posibilidades; quizá se descubriesen otros procesos que ofrecieran más seguridad contra la proliferación.

Muchas dudas surgieron acerca de la aceptación pública de la energía nuclear, de forma que los nuevos objetivos anunciados deberían ofrecer respuesta o aclaración a tales dudas: nada de plutonio, nada de reprocesado, nada de reactores nodriza, al menos en el siglo actual. Sin embargo, y por el contrario, la preocupación pública había sido muy escasa en lo referente a los riesgos de todo tipo –sociales, del medio ambiente, riesgos contra la salud–, producidos por el carbón, la opción energética que con mayor firmeza apoyaba la Administración.

Las ideas de la Administración sobre un tema tan complejo, pueden ser analizadas con la ayuda de un diagrama de secuencia lógica, el cual resultará de utilidad para aclarar algunas de las principales líneas de reflexión en temas tales como el de la proliferación nuclear y su impacto en la seguridad internacional *(veánse las ilustraciones de las páginas 14 y 15)*. Dos vías principales aparecen en el diagrama. En primer lugar está el proceso de decisión horizontal que podría seguir una nación (llamémosla *Y*) que, por el momento, no posee la tecnología nuclear de que estamos tratando. Las preguntas básicas a hacerse y que pueden afectar a la estabilidad internacional serán si esta nación *Y* piensa o no desarrollar y lograr una capacidad genérica en relación con las armas atómicas y, en el caso de que esta primera pregunta se conteste afirmativamente, cuánto tiempo transcurrirá hasta que haya logrado adquirir tal capacidad. La segunda vía se refiere a una serie de entradas o respuestas relacionadas con las decisiones de *Y*, ordenadas verti-




**ALTERNATIVAS ENERGETICAS NORTEAMERICANAS, continuación de las expuestas en las dos páginas anteriores. Las características de las seis últimas situaciones-tipo indicadas en el estudio elaborado por el Servicio de Investigación del Congreso son las siguientes: nivel medio de la demanda, bajo nivel de abastecimiento *(7)*; demanda de tipo medio, bajo nivel en los abastecimientos de recursos derivados del petróleo y de gas natural, pero nivel alto en los correspondientes a la energía carbonífera y nuclear *(8)*; demanda baja, nivel alto en los abastecimientos carboníferos y nucleares *(9)*; demanda baja, abastecimientos de tipo medio *(10)*; nivel bajo en la demanda y en los abastecimientos *(11)*; demanda de bajo nivel, bajo nivel en los abastecimientos de productos petrolíferos y de gas natural, pero alto en los referentes al carbón y nucleares *(12)*. Los autores del proyecto *Interdependence* hacen hincapié en que incluso en el caso de que se produjesen de manera si-**

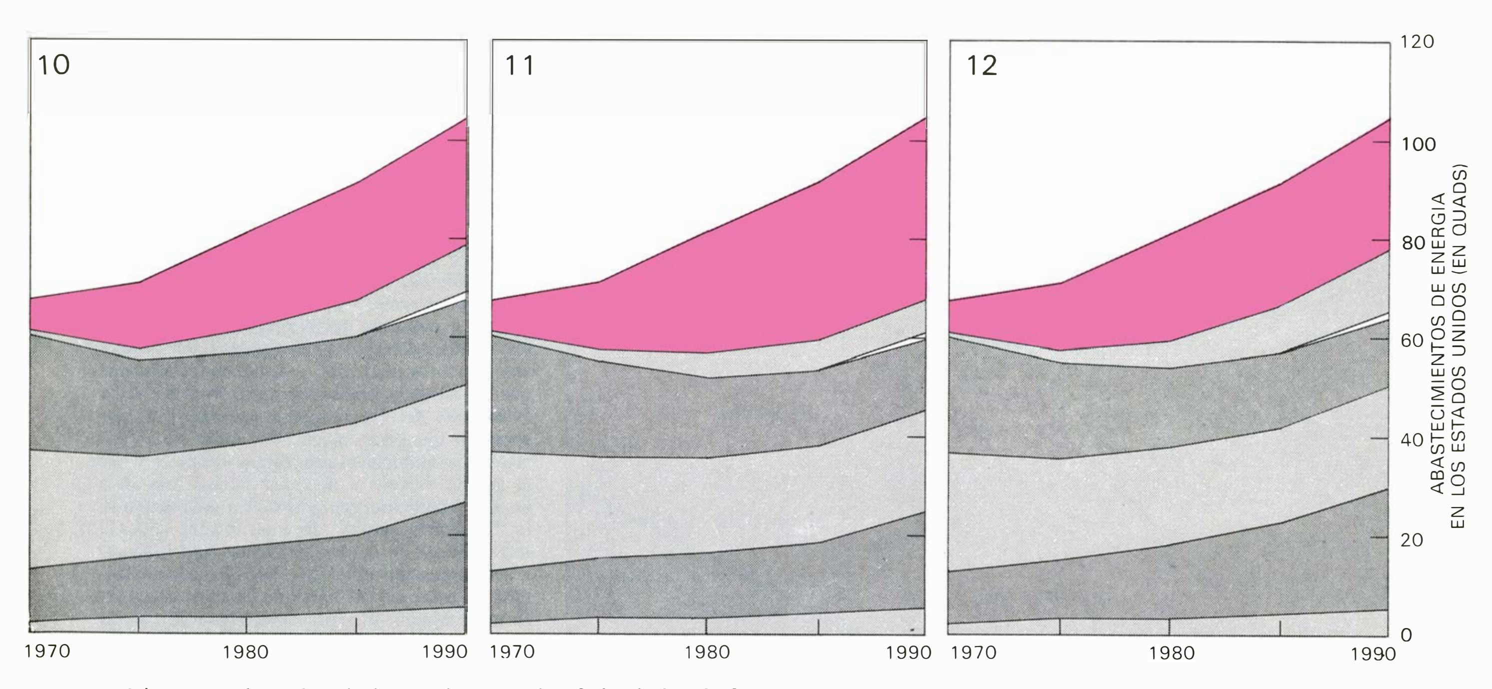
calmente. Para los Estados Unidos, la capacidad de reprocesar el combustible nuclear constituye un factor de estímulo para la proliferación de armamentos ya que, con ella, *Y* dispondría de una fuente de materiales fisionables, aptos para ser empleados en la fabricación de armas atómicas; tales posibilidades de acceder a este tipo de materiales podría influir de forma poderosa en la decisión de *Y* para adquirir armas nucleares y en cualquier caso, una vez que dicho país hubiese tomado esta decisión, sus posibilidades de reprocesado le impulsarían a moverse gradualmente hacia la derecha del diagrama, es decir, precisamente hacia la zona de los armamentos.

El proceso de desarrollo de los acontecimientos aquí señalado resulta demasiado simple. La decisión final de adquirir armas atómicas puede llegar tras un proceso prolongado y complejo y puede alcanzarse simultáneamente con (o puede incluso venir detrás de) la adquisición de algunos de los componentes de un programa de energía atómica civil que, a su vez, podría resultar de utilidad para desarrollar un consecutivo proceso de fabricación de armamento. Por ejemplo, tal podría ser el caso de una central de reprocesado comercial que en su proceso normal de funcionamiento produjese plutonio, separado total o parcialmente del resto de los componentes del combustible irradiado. Tal central de reprocesado sería vista con cierta aprensión por los observadores, incluso en el caso de que no hubiese ninguna segunda intención por parte de una nación pacífica *Y*. La Administración llegó a la conclusión de que bloqueando todas las conexiones en la zona más alta de la figura conseguiría edificar una especie de barrera protectora contra los posibles movimientos de *Y* –conscientes o inconscientes, pero posibles–, hacia una competencia tecnológica de aplicación en la fabricación de armas nucleares.

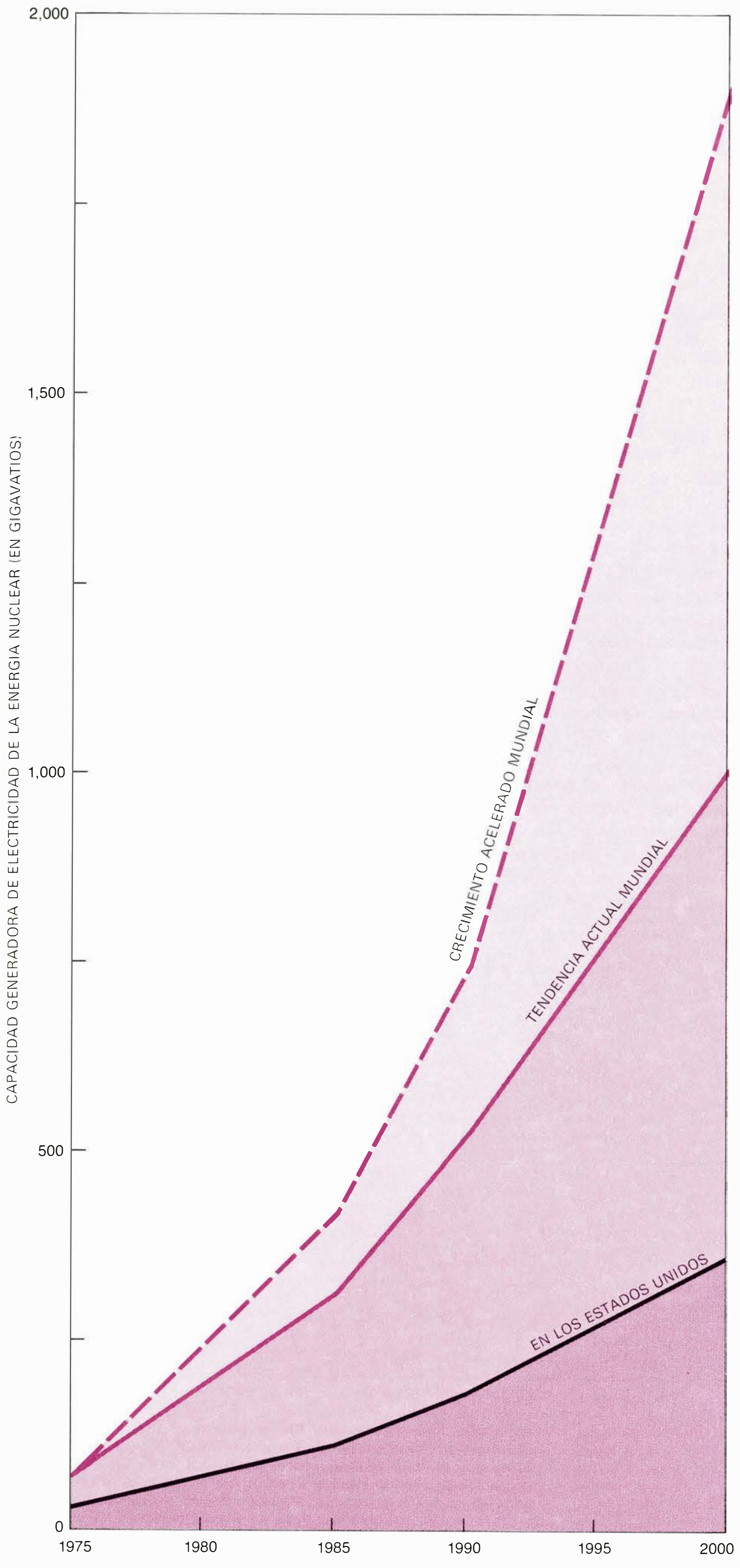
Ni que decir tiene que la Administración era consciente de la existencia de otros métodos por los que *Y* podría obtener materiales fisionables, adecuados para ser empleados en la fabricación de armamentos. En primer lugar, podría importar la tecnología necesaria de otros países, pero ante esto, los Estados Unidos han estado procurando activamente cerrar estos caminos, intentando persuadir al resto de los abastecedores más poderosos de materiales nucleares y de equipo (a través de canales bilaterales, así como utilizando el foro multilateral del Grupo Nuclear de Naciones Exportadoras con sede en Londres) para que llevasen a cabo las necesarias restricciones en la transferencia de artículos "sensibles" que pudiesen ofrecer el peligro de un acceso más fácil a los materiales relacionados con el armamento.

Todos los procedimientos restantes se basan en una decisión consciente de la nación *Y*, acompañada de un esfuerzo considerable por su parte. Esta nación podría desarrollar su propia tecnología civil de reprocesado exclusivamente orientada al principio a usos pacíficos, realizando posteriormente un cambio de orientación provocado por una nueva actitud por parte de su gobierno. También podría intentar producir plutonio apto para su empleo en armas nucleares en reactores de investigación (como hizo la India con motivo de su explosión atómica de 1974), o en pequeños reactores clandestinos; en ambos casos podría recuperar plutonio procedente del combustible irradiado, en pequeñas plantas de reprocesado fabricadas con el exclusivo objeto de lograr estos propósitos, lo que resulta mucho más fácil (y más económico) que el desarrollo de la necesaria tecnología y la construcción de centrales para el reprocesado comercial. Cabría otra posibilidad intentando –por una acción de diversión– pasar combustible comercial irradiado (que se encontrase depositado en instalaciones de almacenaje temporal y en espera de su reprocesado comercial, o bien hallarse en un cementerio atómico en caso de tratarse de combustible de un solo uso o vez) hasta una planta de reprocesado clandestina.

Mejor aún que trabajar con un plutonio procedente del combustible consumido, el país *Y* podría intentar extraer




**multánea y conjunta las siguientes circunstancias: bajo nivel en la demanda de energía, empleo intensivo y extensivo del carbón, poder incrementado en la energía nuclear, aumento de un 50 por ciento sobre las reservas de gas natural del país, así como de un 100 por ciento sobre las reservas nacionales de productos petrolíferos *(situación número 9)*, los Estados Unidos se verían aún en la necesidad de importar cerca de 20 quads de energía hacia el año 1985, lo que equivale a casi 9 millones de barriles de crudos diarios. Por otra parte, si la tasa de crecimiento económico es superior a 3,5 veces el incremento del producto nacional bruto propuesto en el caso básico, y todos los sectores nacionales que proporcionan energía tienden a convertirse en menos productivos de lo previsto *(situación número 3)*, los Estados Unidos podrían verse forzados a importar 17,7 millones diarios de barriles de crudos en 1985. El papel futuro del petróleo, como combustible "comodín", resulta evidente *(color)*.**




el isótopo fisionable del uranio 235, del uranio natural (que contiene menos del 1 por ciento de U-235), o del uranio poco enriquecido empleado como combustible en los reactores energéticos (alrededor del 3 por ciento de U-235), concentrándolos, digamos, hasta un 90 por ciento. En relación con este procedimiento, existen hoy día diversas tecnologías que han alcanzado diferentes etapas de desarrollo. Durante los últimos 25 años, todos los procesos de enriquecimiento, sean para su empleo en reactores de energía o para ser empleados en la fabricación de armas atómicas, se han desarrollado en inmensas plantas de difusión gaseosa, norteamericanas y soviéticas. Sin embargo, las centrales de difusión gaseosa no necesitan construirse con unas dimensiones tan exageradas; más aún, han aparecido actualmente otras tecnologías que están desafiando la actual posición dominante de la difusión gaseosa. En varios países se está desarrollando activamente el enriquecimiento ultracentrífugo y en algunos de ellos se está a punto de alcanzar la fase de comercialización. Este proceso necesita menos energía que el de difusión gaseosa y posee además otras ventajas. Estos factores, unidos a una mayor flexibilidad operativa de las plantas centrífugas, hacen pensar que esta tecnología podrá ofrecer un camino más fácil hacia el logro de los materiales necesarios en el armamento nuclear, bien a través de la construcción de una central para este uso específico, o bien a través de unas instalaciones fabricadas en principio para satisfacer las necesidades civiles de

**POSIBLES TENDENCIAS en el crecimiento de la energía nuclear hasta finales del siglo actual, tanto en los Estados Unidos como en el resto del mundo (exceptuando China, Unión Soviética y los países de Europa Oriental). A nivel mundial, la estimación más baja está basada en las tendencias actuales sobre abastecimiento y consumo de energía, con inclusión de los actuales retrasos en la construcción de nuevos reactores nucleares y, asimismo, presupone que las actuales tendencias van a continuar. La estimación del "crecimiento acelerado" da por supuesto que serán alcanzados todos los objetivos de los ambiciosos programas atómicos y que el mundo volverá a alcanzar ritmos más altos en el crecimiento energético. La estimación de la "tendencia actual" debe ser mirada como la más realista de las dos, e incluso podría llegar a ser demasiado alta. Los datos para la confección de estas curvas han sido sacados de un informe conjunto, recientemente elaborado por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) y por la Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA). Las perspectivas norteamericanas están basadas en las recientes estimaciones elaboradas por el Departamento de Energía. Según indican los autores de este artículo, todas las estimaciones que aparecen en estos gráficos deben ser tomadas con gran cautela, a la vista de las muchas incertidumbres que planean todavía sobre el tema.**

energía atómica. Resultaría mucho más fácil llevar a cabo los necesarios reajustes para transformar una planta centrífuga de gas, apta para producir materiales poco enriquecidos, en otra capaz de lograr productos altamente enriquecidos a nivel militar, que realizar reajustes similares en una planta de difusión gaseosa; por otra parte pueden utilizarse, una y otra vez y en forma progresiva, una serie de pequeñas plantas centrífugas para enriquecer los sucesivos lotes de uranio.

Otras técnicas para el enriquecimiento, que están adquiriendo importancia, incluyen las de acceso aerodinámico, o de "boquilla", algunas de cuyas variantes se están desarrollando actualmente de forma conjunta en Alemania Federal y Sudáfrica, así como la técnica láser para la separación de isótopos, que está siendo experimentada en varios países. Es posible que una planta piloto construida en Sudáfrica para la realización de un enriquecimiento aerodinámico haya sido ya utilizada para producir un uranio suficiente –y de una graduación adecuada para su empleo en la fabricación de armamentos–, para su empleo en uno o más de estos ingenios explosivos. Además, y aunque la técnica láser de enriquecimiento haya quedado limitada hasta la fecha a la investigación en laboratorio, se ha logrado disponer de la suficiente información para llegar a la conclusión de que estas técnicas podrían proporcionar finalmente un camino más económico y más flexible que cualquier otro en los procesos de enriquecimiento. Todos los métodos conocidos, cualquiera que sea su estado de desarrollo, requieren una tecnología muy compleja, pero no hay nada, sin embargo, que quede fuera del alcance de la capacidad y posibilidades de muchas de las naciones de desarrollo más avanzado.

Volviendo de nuevo a tratar de cuestiones aparentemente más "emocionantes", el país *Y* podría utilizar agentes especiales para el robo de materiales en el extranjero, o para su adquisición en los mercados negros, en los mercados normales, o tal vez en otro tipo de mercados intermedios –llamémosles "grises". Podría recibir dichos materiales como obsequio, o como un empréstito de otros gobiernos amigos. Podría robar un arma con todos sus componentes ya montados, e incluso algún país podría hacerle donación de alguna. Ninguna de estas posibles actividades puede ser excluida, e incluso puede aparecer alguna otra diferente de las hasta ahora descritas.

Un obstáculo verdaderamente eficaz contra la proliferación de armamentos tendría que incluir el bloqueo de la totalidad de las líneas señaladas con una barra negra en el diagrama. Ello resultaría imposible, así que en realidad los Estados Unidos únicamente están intentando conseguir que dicha proliferación sea mucho más dificultosa que hasta ahora. Combinando activamente una negativa ante solicitudes de tecnología, con el ofrecimiento de una serie de incentivos varios en relación con el abastecimiento de elementos enriquecidos para el combustible de los reactores de agua ligera (incluso a disposición del país *Y* bajo unas condiciones muy precisas y rígidas), la Administración considera que podría aumentarse considerablemente la estabilidad internacional.

Existen otras distintas vías de decisión, de diferente naturaleza, en las que el gobierno estadounidense solamente puede ejercer su influencia de manera indirecta; las principales están señaladas con barras de color gris. ¿Por qué el país *Y* decide en primera urgencia aumentar su capacidad en armamentos? ¿Por qué está fabricando realmente armas atómicas? ¿Por qué podría llegar incluso a emplearlas? Las contestaciones a estas preguntas dependen de multitud de factores, y una política a largo plazo consistente en dejar sin respuesta todas las anteriores preguntas, o vías de decisión, haría inservibles y carentes de interés todos los posibles adelantos tecnológicos. Sin embargo, lo contrario no es necesariamente cierto. Como dábamos a entender al discutir sobre las centrales de reprocesado, la decisión sobre la realización o no de los tratamientos podría estar muy influida por la capacidad tecnológica alcanzada en ese momento.

Cuando la política norteamericana hasta ahora descrita se contempla desde otros países, o desde algún punto de vista ventajoso de este mismo país, aparece completamente distinta. La principal línea de conducta –en particular las decisiones tomadas por la nación *Y*– puede discutirse mejor si se la relaciona con un segundo diagrama, similar al primero, pero que se inicia con la decisión de los Estados Unidos de adoptar una actitud más restrictiva; incluye también algunas posibilidades lógicas y complementarias de actuación. Para comprender su exacta importancia debemos retroceder mucho más atrás, y comenzar hablando del sector de la energía eléctrica.

La industria norteamericana de la energía eléctrica siente, por razones diversas, una gran preocupación ante las incertidumbres que presenta el futuro. Una de estas incertidumbres se basa en el largo período de tiempo necesario para la construcción de nuevas instalaciones (se ha hecho clásica la cifra de los 10 años) y la larga vida prevista de las mismas (se habla de 40 años). Este tipo de industria requiere una alimentación mantenida y estable y la ley le exige unos servicios puntuales y dignos de confianza. En esta industria regulada, los costos justificables pueden ser cargados al consumidor. El programa actual de la Administración ha hecho aumentar el grado de incertidumbre sobre el futuro de la energía nuclear por varios motivos. En primar lugar, la decisión contraria al reprocesado del combustible consumido ha hecho surgir el temor –no del todo aplacado por el Gobierno Federal– de que la industria que funcione con electricidad pueda tener que llegar a abandonarse, al mantener por mucho tiempo el combustible consumido (pueden representar un buen ejemplo las constantes recusaciones de los tribunales ante un proyecto federal para la construcción de instalaciones para el depósito y almacenamiento del combustible nuclear consumido), lo que significa unas perspectivas poco halagüeñas para el sector de la industria eléctrica.

Además, las conflictivas opiniones federales sobre la aceptación de la energía nuclear convierten a la industria eléctrica en sospechosa, por una parte, de ser tomada bajo la protección gubernamental y, por otra, de convertirse en el objetivo de grupos opuestos a la energía nuclear. En muchas de las existentes instalaciones de energía eléctrica se teme también que la Comisión Reguladora Nuclear imponga una serie de modificaciones con carácter retroactivo –que pueden resultar muy gravosas, e incluso desde su punto de vista caprichosas– en las actuales plantas nucleares, a pesar de los esfuerzos que hoy día se están realizando para intentar modificar la organización legislativa de dicha Comisión. Muchos expertos, preocupados ante lo dudosa que resulta la cifra de cuatro millones de toneladas de uranio, calculadas como los recursos que podrían disponer a largo plazo los Estados Unidos, piensan que si se realizase un "prudente estudio de planificación" para el caso de que la política de energía nuclear entrase en vigor, este estudio llegaría sin duda a unos resultados sensiblemente más bajos. Un grupo de técnicos en evaluación de recursos, pertenecientes a la Academia Nacional de Ciencias, ha calculado recientemente que tan sólo 1,8 millones de toneladas es la cantidad que con toda probabilidad podría haber llegado a ex-

traerse en Norteamérica hacia el año 2010, a un costo de unos 30 dólares la libra, e incluso a un precio menor, aún en el caso de que el gobierno mantuviese el criterio de estimular al máximo estos procesos.

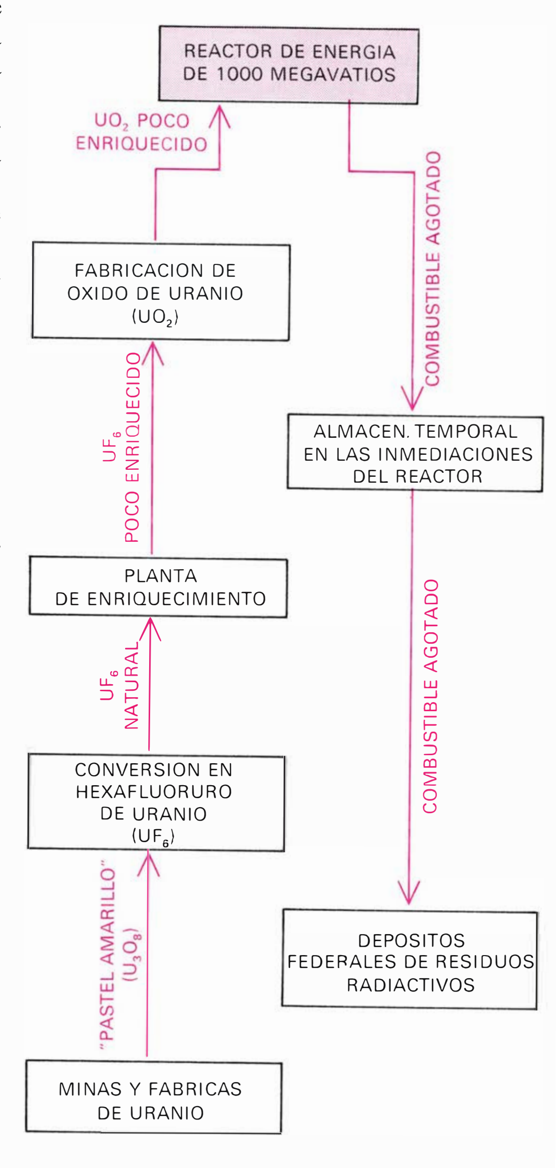
Insistiendo en lo anterior, se han expresado dudas sobre si la industria de abastecimiento de uranio –cargada ya en sí misma con la incertidumbre que representan las posibles dimensiones del mercado para su producto–, estará o no preparada para poder realizar inversiones en la prospección, extracción y construcción de plantas para el tratamiento del mineral, a unos niveles y en un grado que resulten adecuados para alimentar un número creciente de centrales de energía nuclear. Parte de esta incertidumbre ha permitido que el sector eléctrico pueda mantener dominada y sin aumentar su preocupación sobre la disponibilidad de niveles de combustible nuclear, de forma que el problema presenta unas características circulares de circuito cerrado; todavía se agrava más si se considera que el grado de implicación de la industria de abastecimiento de uranio en el mantenimiento de los reactores de energía nuclear resulte menor del que éstos pudiesen considerar más adecuado. Por ejemplo, se ha calculado que dentro de pocos años las compañías petrolíferas tendrán la propiedad de aproximadamente el 40 por ciento de todo el potencial norteamericano de tratamiento del mineral y hasta del 50 por ciento de los recursos de uranio de bajo coste en los Estados Unidos. En pocas palabras, los abastecimientos de uranio no constituyen precisamente una industria "engañosa" para el sector de la energía eléctrica (en realidad, la progresiva diversificación de las distintas industrias de abastecimiento de energía ha llevado a muchos a sugestionarse creyendo que lo contrario podría ser cierto). En consecuencia, del programa elaborado por la Administración puede surgir una sensación de incertidumbre –de forma más o menos inconsciente–. De manera similar, todos los constructores norteamericanos de reactores nucleares tienen el 75 por ciento, o más aún, de su potencial económico orientado hacia otros sectores de la economía (por ejemplo, otros sistemas energéticos) y el negocio nuclear no les resulta demasiado esencial. En una época de costos crecientes, de cancelación de pedidos en gran escala y de excesos en la capacidad de producción, este negocio aparece muy poco atractivo.

Este último punto merece un comentario más detallado. Los fabricantes norteamericanos de reactores de agua ligera podrían producir de 20 a 30 de sus sistemas de energía nuclear al año. La Administración ha calculado que una completa puesta en funcionamiento de su política energética nacional llegaría a completar una capacidad eléctrico-nuclear instalada de más de 300.000 megavatios para el año 2000. Con 50.000 megavatios ya instalados y otros 25.000 previstos para 1980, haría falta por término medio una docena anual de reactores terminados durante los últimos 20 años del siglo actual, situación que, tarde o temprano, exigirá la reestructuración a gran escala de la industria constructora de reactores.

Unida a todas estas dificultades, el sector de instalaciones eléctricas añade una dificultad más: la de promoción de capital suficiente. Una de las causas de este problema está en el conjunto de incertidumbres ya descrito. Otra estriba en la fuga de capitales que de forma general se ha producido en las últimas épocas de inflación en las inversiones a largo plazo; la tasa de recuperación económica en esta industria regulada no ha llegado a ser atractiva, circunstancia que también afecta a otros tipos de plantas generadoras, especialmente aquellas cuyo funcionamiento está basado en el carbón.

El resultado final de todo esto conduce a la paradójica situación de que, aunque todos los reactores nucleares existentes funcionan perfectamente bien y proporcionan la necesaria y económica energía eléctrica en muchas zonas del país, la industria nuclear de los Estados Unidos está próxima a sufrir un colapso. La causa inmediata puede estar en un movimiento de huida de la industria eléctrica y de los fabricantes, con respecto a la energía nuclear, en tanto que tratan de reducir su propia incertidumbre institucional; pero existen otros motivos más profundos que provocan estos cambios y que están muy relacionados con la actitud que presenta la Administración hacia la energía nuclear. Estas ideas apuntan hacia el segundo motivo posible, mencionado al principio de este artículo: es decir, la posibilidad de que la Administración, a causa de una profunda indecisión interna, sea incapaz de actuar eficazmente para impedir que se produzca un auténtico colapso en la industria nuclear. Sin embargo, las señales de que sea lo que está ocurriendo no son muy claras.

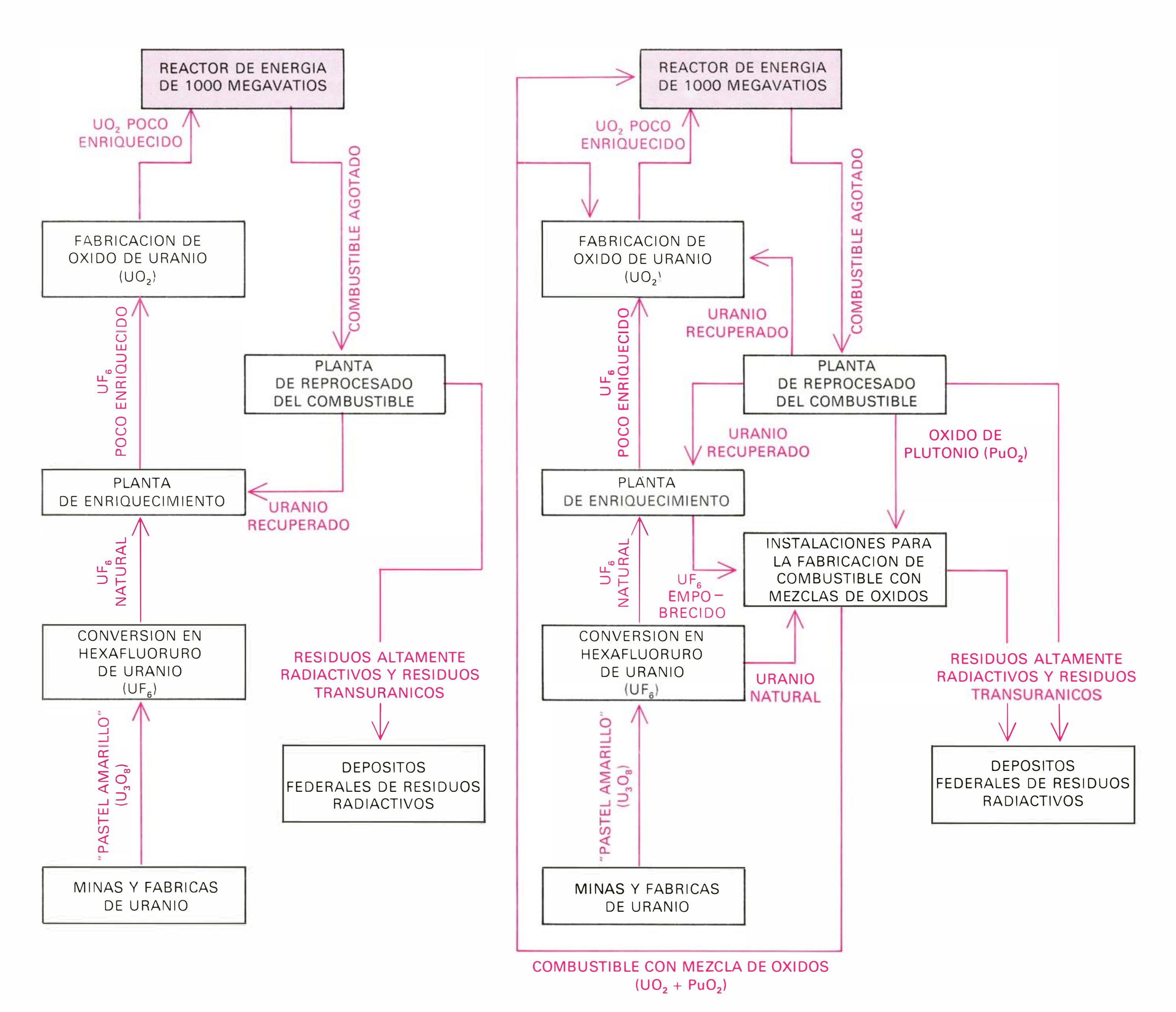
¿Qué es, pues, lo que tendrá que hacer el sector norteamericano que emplea energía eléctrica? La opción convencional está en el carbón, que cuenta además con un respaldo aparentemente entusiasta de la Administración. Los productos derivados del petróleo y el gas natural resultan muy caros y de unas posibilidades muy dudosas en cuanto a su abastecimiento, hasta el punto que la Administración ha propuesto un tipo de legislación prohibiendo su consumo en todas las nuevas centrales de energía, con muy pocas excepciones, todas ellas de carácter económico o relacionadas con el medio ambiente. Otras disposiciones legales tratarían de forzar –a través de un sis-




**TRES CICLOS del combustible nuclear adecuados para su utilización en los reactores convencionales de agua ligera. Estos diagramas, simplificados, han sido confeccionados adaptando un reciente informe elevado a la Sociedad Física Americana por el grupo de estudio encargado de los ciclos del combustible nuclear y de la manipulación de los residuos. En el primer caso, el más destacado, que podemos llamar "ciclo de una sola vez"** *(izquierda)*, **las varillas de combustible consumido –que todavía contienen una considerable cantidad de isótopos fisionables (uranio 235 y plutonio 239 no consumidos por la combustión y que han aparecido**

tema de tasas y de cláusulas restrictivas– a no utilizar productos petrolíferos ni gas natural en las instalaciones, así como a transformar éstas para su funcionamiento con carbón.

Pero, ¿qué ocurriría si el carbón no pudiese ser extraído, transportado y consumido a tiempo y utilizando procedimientos socialmente aceptables? Antes incluso de que la Administración anunciase su nueva política energética nacional aparecieron dudas generalizadas sobre si resultaría acertado, o incluso posible, aumentar con rapidez la producción carbonífera. ¿Puede alcanzarse realmente el objetivo de aumentar la producción de carbón desde sus niveles actuales de 650 millones de toneladas anuales hasta un total de 1250 millones de toneladas anuales previstas para 1985? Los problemas industriales relacionados con semejante expansión, los problemas de utilización del terreno, las normas particulares vigentes en los diferentes estados y los obstáculos creados por la política de la Administración en relación con el medio ambiente y el carbón, han sido todos ellos esgrimidos repetidamente para predecir que se producirán muchos titubeos tanto del lado de la oferta como del de la demanda, dentro de la industria del carbón. Incluso su transporte, que en la actualidad comprende

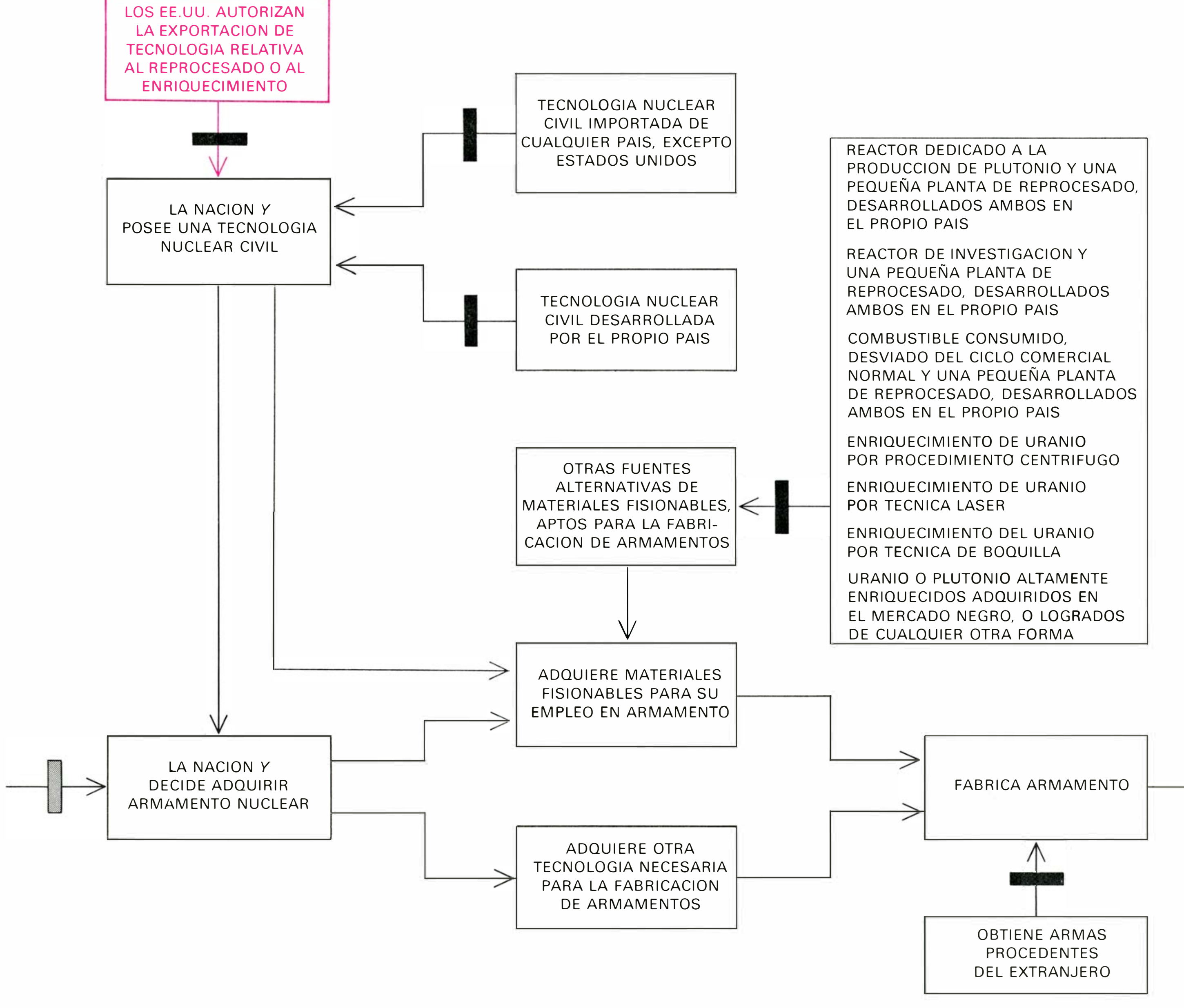



**por la transformación de los núcleos del uranio 238 en el combustible), se dejan sin ser sometidos a reprocesado. La no utilización de este combustible consumido puede tener en principio carácter temporal o permanente. En la opción del "paso del uranio por un nuevo ciclo"** *(centro)*, **al combustible agotado se le reprocesa para recuperar únicamente el uranio residual, el cual puede entonces ser enriquecido en el isótopo fisionable U-235, o ser utilizado tal como está para reemplazar parte del urario natural fértil en la fabricación de nuevo combustible. En la opción del "paso del uranio y plutonio por nuevo ciclo"** *(derecha)*, **el combustible agotado es reprocesado para separar el uranio y el plutonio de los residuos. El plutonio recuperado puede combinarse a continuación con un tipo de uranio que tenga una concentración muy baja de U-235, lo que logra producir un efecto similar al de sustituir el plutonio por parte del U-235 en el combustible generalmente poco enriquecido. Puede conseguirse un combustible muy útil, como mezcla de óxido, combinando el plutonio con un uranio procedente de varias fuentes distintas (verbigracia: uranio normal poco enriquecido producido en una planta separadora de isótopos, uranio recuperado del combustible consumido o bien los restos agotados de una planta de enriquecimiento de uranio). Se ha calculado que con el paso del uranio y plutonio por un nuevo ciclo, las operaciones industriales necesarias para proporcionar uranio enriquecido podrían reducirse alrededor de un 20 por ciento hacia el año 2000 en comparación con las que serían necesarias, tanto para la opción del paso del uranio por un nuevo proceso, como para la del proceso de una sola vez. Este ahorro llevaría consigo por supuesto la introducción necesaria de las complicadas y costosas técnicas imprescindibles para la realización del nuevo tratamiento o reprocesado, así como las operaciones correspondientes a la fabricación del combustible con mezcla de óxido.**

el 30 por ciento del tonelaje total transportado por ferrocarril en Norteamérica, resultaría problemático para la complicada industria del transporte ferroviario.

Los problemas del medio ambiente relacionados con el carbón aumentarán con el paso del tiempo y con un conocimiento más profundo de todas sus implicaciones. Las comparativamente extensas zonas alteradas en su fisonomía, las moléculas activadas tanto química como biológicamente que están presentes en el carbón y que se producen en su combustión, así como la naturaleza omnipresente de estos efectos, crean dificultades a nivel local y nacional. En términos generales, el impacto más serio y de mayores consecuencias que puede surgir en relación con los problemas del medio ambiente es el originado por los efectos de la creciente concentración de dióxido de carbono en la atmósfera. En estos momentos el problema no es bien conocido y la potencial contribución que aportarán para resolver este problema las actividades programadas por los Estados Unidos en el estudio de la combustión del carbón resulta igualmente incierta. Sin embargo, en lo relativo a este y a otros problemas, los vaticinios aparecen más serios a medida que se va disponiendo de mayor información. El sector norteamericano que utiliza energía eléctrica, consciente por lo general de estas dificultades, dirige su mirada hacia el carbón con una inquietud creciente.

Las dudas con respecto a la energía nuclear, las dificultades cada vez más evidentes que presentan los recursos carboníferos, una parcial prohibición en contra de los crudos y la actitud más o menos decidida en favor del ahorro y la conservación de la energía, son factores que difícilmente podrán llegar a conjugarse; algo habrá que hacer, sin embargo. Si la industria que utiliza energía eléctrica se retrasa tan sólo unos pocos años en tratar de decidir y resolver sobre estas cuestiones, la simultánea presión ejercida para conseguir con rapidez unas instalaciones libres –en cierta medida– de polución, orientarán a estas industrias hacia los productos derivados del petróleo para resolver sus problemas




**UNA SITUACION-TIPO relativa a la proliferación nuclear, y considerada actualmente como alarmante por el gobierno norteamericano, aparece en estas figuras en forma de diagrama de secuencias lógicas. La principal línea horizontal de decisión nos muestra la serie de pasos que podría dar una nación que no poseyese aún armas nucleares, que designaremos *Y*, pero que desease llegar a poseer y a emplear dicho tipo de armas. Las líneas verticales muestran diversas entradas o respuestas posibles ante la decisión de *Y*. Por ejemplo, Norteamérica considera que el logro de la capacidad de reprocesado del combustible nuclear agotado constituye un estímulo en la proliferación de armamentos.**

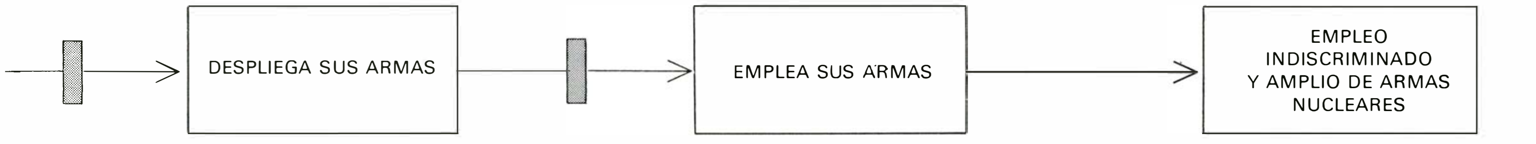
energéticos. Esto resultaría desastroso por partida doble, porque la conversión de algunos medios de transporte, sistemas industriales, comerciales y domésticos que funcionaban gracias a los productos petrolíferos, a un eficiente uso de la electricidad –basada en combustibles carboníferos o nucleares– es vista como una posible solución para reducir las importaciones de petróleo. Si las industrias que utilizan energía eléctrica son incapaces, o no están dispuestas, a dar facilidades para esta conversión, el consumo de productos derivados del petróleo continuará superando los niveles previstos en los objetivos de la Administración.

Las importaciones de crudos pueden, una vez más, llegar a tener que representar el papel que la Administración está empeñada en impedirles realizar: el de combustible "comodín", que sirve para dar satisfacción a una creciente demanda de energía. El actual énfasis puesto en lograr una producción interior cada vez mayor apoya y refuerza esta orientación y con ello se trata de conseguir el efecto de mantener en equilibrio las actividades basadas en la energía petrolífera, actividades que se teme que en el próximo decenio, o al menos en dos decenios, tengan que ser alimentadas a base de importaciones.

La importancia internacional que reviste los esfuerzos del Presidente Carter para reducir las importaciones de petróleo y los peligros que encierra el fracasar en estos intentos, no pueden ser minimizados. Hoy día, los Estados Unidos se ven obligados a importar la mitad casi del inmenso consumo que representan sus 17 millones diarios de barriles, cantidad equiparable a casi la cuarta parte de la totalidad del petróleo mundial comercializado. Una reducción inferior a los 7 millones diarios de barriles hacia 1985 –que es el propósito que ha manifestado la Administración a la hora de pensar en la realización de importaciones–, tomando como referencia los niveles que de cualquier forma se alcanzarían en el caso de que las actuales tendencias se mantuviesen sin disminuir, permitiría un ahorro anual de crudos superior a las actuales importaciones petrolíferas del Japón, o a una mitad de las de Europa Occidental. Si estos objetivos no se alcanzan y las importaciones norteamericanas aumentan, las presiones competitivas sobre crudos, especialmente los crudos de Oriente Medio, pueden llegar a alcanzar proporciones peligrosas, incluso sin tener en cuenta otras posibles interrupciones de matiz político en los abastecimientos. Ninguna otra nación del mundo (con la posible excepción de Arabia Saudita, con su enorme capacidad potencial de producción y su papel de productor "comodín") puede ejercer una influencia tan importante sobre las perspectivas mundiales de energía a través de las medidas y decisiones de su política interior.

Después de este análisis podemos volver ya al diagrama de secuencias lógicas de las páginas 18 y 19, en el punto en que los Estados Unidos definen su posición en relación con la política nuclear y, a continuación, estudiar las consecuencias internacionales provocadas por esta política.

Todas las anteriores líneas de reflexión han resultado evidentes por completo, tanto para las naciones en vías de desarrollo como para las desarrolladas. Japón y la mayor parte de las naciones industrialmente avanzadas de Europa poseen, en sí mismas, unos recursos carboníferos y petrolíferos muy escasos, hablando en términos relativos; el mismo petróleo del Mar del Norte, si llegase a explotarse al máximo ritmo de su capacidad, sólo podría cubrir aproximadamente el 20 por ciento de las necesidades de Europa Occidental. Por ello, todos estos países, al hacer frente a sus propias dificultades y ante la clara realidad de unos Estados Unidos cada vez más insaciables, ven un creciente y poderoso incentivo en potenciar sus propios programas nucleares, entre los que incluyen el reprocesado y los reactores nodriza. Un nuevo estímulo para seguir por este camino parece haber aparecido desde unos orígenes que no estaban previstos. Australia (país que no es productor de uranio en la actualidad, pero que en el plazo de muy pocos años se convertirá en uno de los dos o tres exportadores mundiales más importantes de este elemento) y Canadá (el mayor exportador mundial de uranio hoy en día), junto con Norteamérica, han impuesto recientemente unas estrictas medidas de control sobre sus exportaciones de artículos que puedan estar relacionados con la proliferación de armamentos. En los casos de estos tres países, estas medidas comprenden la obligación de obtener la autorización de la nación exportadora antes de que todo o parte del combustible nuclear pueda ser sometido a nuevo tratamiento. Al menos en una ocasión, que se sepa, los envíos de combustible han quedado suspendidos hasta que por el país importador se cumpliese ésta y otras de las condiciones exigidas. Aunque estas medidas de control han sido establecidas con la intención de crear unas garantías más rigurosas sobre proliferación, para los japoneses y europeos –tan sensibles y reticentes ante todo lo que afecte a sus deficiencias en uranio y a los abastecimientos de energía–, tales muestras externas de interferencia política en sus procesos internos del tratamiento del combustible, junto con las imprevisibles perspectivas futuras en cuanto al amistoso comportamiento de sus actuales abastecedores, puede influir a la larga en el endurecimiento de estas naciones a la hora de intentar reducir su dependencia respecto de las importaciones de combus-




**De acuerdo con esta idea, la Administración ha intentado restringir las exportaciones relacionadas con la tecnología del reprocesado comercial, en un intento de cerrar esta vía de acceso en la adquisición de armas atómicas. Sin embargo, hay otros caminos por los que *Y* podría llegar a conseguir la posesión de materiales aptos para la fabricación de armamentos; algunas de estas posibles vías están señaladas en la casilla mayor. Si los Estados Unidos deseasen levantar eficaces barreras contra la proliferación nuclear tendrían que bloquear las líneas marcadas con una barra negra. Aquellas líneas de decisión en las que tan sólo puede ejercer una influencia indirecta figuran señaladas con barras de color gris.**

tible, empleando ellas mismas reactores de plutonio y nodrizas. De acuerdo con las declaraciones de propósitos de algunas de estas naciones, esto está ya sucediendo.

¿Qué es lo que aparecerá ante los ojos de los dirigentes de los países en vías de desarrollo? Unos Estados Unidos ricos y predispuestos a abandonar la energía nuclear, a pesar de todo lo que puedan estar diciendo acerca de su intención de conservar los reactores de agua ligera. Presiones cada vez mayores a corto plazo sobre los abastecimientos de crudos, lo que desembocará inevitablemente en escasez y en unos precios todavía más altos. Verán acercarse unas perspectivas pesimistas en relación con los recursos mundiales de petróleo y de gas natural, que impedirán, por una parte, que las naciones industrializadas puedan seguir haciendo uso de ellos con liberalidad y, por otra, que sus propios países puedan alcanzar un desarrollo semejante al conseguido por sus predecesores. Serán objeto de una oferta de combustible nuclear que les ligará y hará depender de la buena voluntad norteamericana y de los demás países desarrollados, incluso para lograr una asistencia nuclear limitada. (La reciente sugerencia para la creación de un banco internacional de combustible nuclear constituye una respuesta parcial a este punto.) Verán un mundo que de forma creciente va a aparecer dividido, por una parte, en un oligopolio de países desarrollados que se irá transformando en una oligarquía a medida que la energía nuclear se hace más importante a escala mundial y, por otra, en un batiburrillo de naciones menos desarrolladas, que están condenadas a quedar más y más atrasadas. (Esta última impresión se ha visto reforzada a través de las acciones de los Estados Unidos que tratan a algunos de sus socios comerciales más industrializados como "casos excepcionales", a la vista de su continuada insistencia sobre sus urgentes necesidades en reactores nodriza y de reprocesado.) Verán, por fin, una predisposición de ayuda muy escasa por parte de Norteamérica ante sus deseos de independizarse en todo lo referente a la energía nuclear.

La consecuencia inevitable de todo lo anterior será una creciente desconfianza hacia los Estados Unidos, así como una sensación cada vez mayor de estar padeciendo una dependencia no deseada. De esta sensación de inseguridad participan no sólo las naciones en vías de desarrollo, sino también las desarrolladas. Considerando solamente como ejemplo el poder de enriquecimiento del uranio, ¿podría una oferta norteamericana de aumentar los servicios de enriquecimiento ser tomada como un deseo de los Estados Unidos de aumentar el control ejercido sobre los mercados en lo referente a medios de enriquecimiento, lo que a su vez representaría una mayor dependencia de los caprichos norteamericanos? El mundo exterior, incluidos los países menos desarrollados, preocupado principalmente por la voluble naturaleza de los procesos de decisión que rigen las exportaciones norteamericanas, vislumbran unas perspectivas más favorables en el desarrollo de sus propios programas de enriquecimiento, con o sin ayuda estadounidense.

De igual forma, los países en vías de desarrollo y los países desarrollados comparten otras reacciones comunes. Se tiene la sospecha en ambos grupos de naciones, por ejemplo, de que el programa de Norteamérica está trazado con el propósito de mejorar la tambaleante suerte de las exportaciones nucleares de los Estados Unidos; no sólo para aumentar el atractivo de los reactores de agua ligera, sino también para frenar el movimiento general hacia los reactores de plutonio y nodriza hasta tanto la tecnología norteamericana en dichos campos haya podido emparejarse con las posibilidades en Europa Occidental. También se ha señalado que la ejemplar decisión norteamericana de aplazar indefinidamente el reprocesado del combustible comercial de sus reactores de energía quedó comprometida desde el principio por el hecho de que iba a permanecer invariable el reprocesado del combustible en relación con sus programas de armamento. Comentarios de este estilo se dirigen en contra de la totalidad de las actividades norteamericanas de fabricación de armas, así como de las de armas ya fabricadas y desplegadas, sugiriendo que la importancia y amplio despliegue de este sistema representan objetivos más atractivos para los partidarios de la proliferación que los que estarían representados por un ciclo comercial del plutonio. Además, algunos observadores han especulado con la idea de que la posterior decisión de emplear la tecnología de la centrifugación gaseosa para dar el siguiente paso hacia el aumento de la capacidad de enriquecimiento produce una combinación de las faltas de coherencia actuales, mejor que conseguir una planta de difusión gaseosa más eficaz contra la proliferación.

En realidad, algunas de estas reacciones no son otra cosa que juegos florales de retórica; sin embargo, pueden alcanzar reflejos internacionales de largo

alcance. Además, muchas de las reacciones anteriormente señaladas son contradictorias. ¿Cómo puede una Norteamérica rica y predispuesta al abandono de la energía nuclear, intentar aumentar su participación en las exportaciones nucleares? ¿Cómo puede explicarse el hecho de que algunas de las naciones en las que más quejas se han oído acerca de la incoherencia de la política estadounidense sobre reprocesado, sean las mismas que padecen una dependencia más intensa para su defensa del poder de disuasión nuclear de los Estados Unidos? Tales contradicciones no hacen, sin embargo, más que reflejar las ambigüedades y paradojas que hemos estado descubriendo en la política norteamericana en su intento, de una parte, de fortalecer las barreras que limitan los empleos pacífico y violento de la energía atómica, mientras que, de la otra, se enfrentan simultáneamente con una enorme y creciente demanda de energía, tanto interior como internacional.

El Tratado de No Proliferación, del que existen ya más de cien signatarios, comprende un acuerdo internacionalmente negociado, relativo a la definición del espacio o contexto dentro del que ha de ser resuelto el dilema energía-proliferación. En éste, el conjunto de naciones que no poseen armas nucleares –dentro del Tratado–, se comprometen a no desarrollar, ni de cualquier forma adquirir, ningún explosivo atómico en sus diversas modalidades, así como se comprometen igualmente a aceptar garantías y controles internacionales en todas sus actividades internas relacionadas con el uso pacífico de la energía nuclear. Como contrapartida a este compromiso se afirma, en el Tratado, el derecho de todos los signatarios del mismo a desarrollar y emplear la energía nuclear con fines pacíficos, así como a tomar parte en intercambios de equipo, material y tecnología con destino al uso pacífico de la energía atómica.

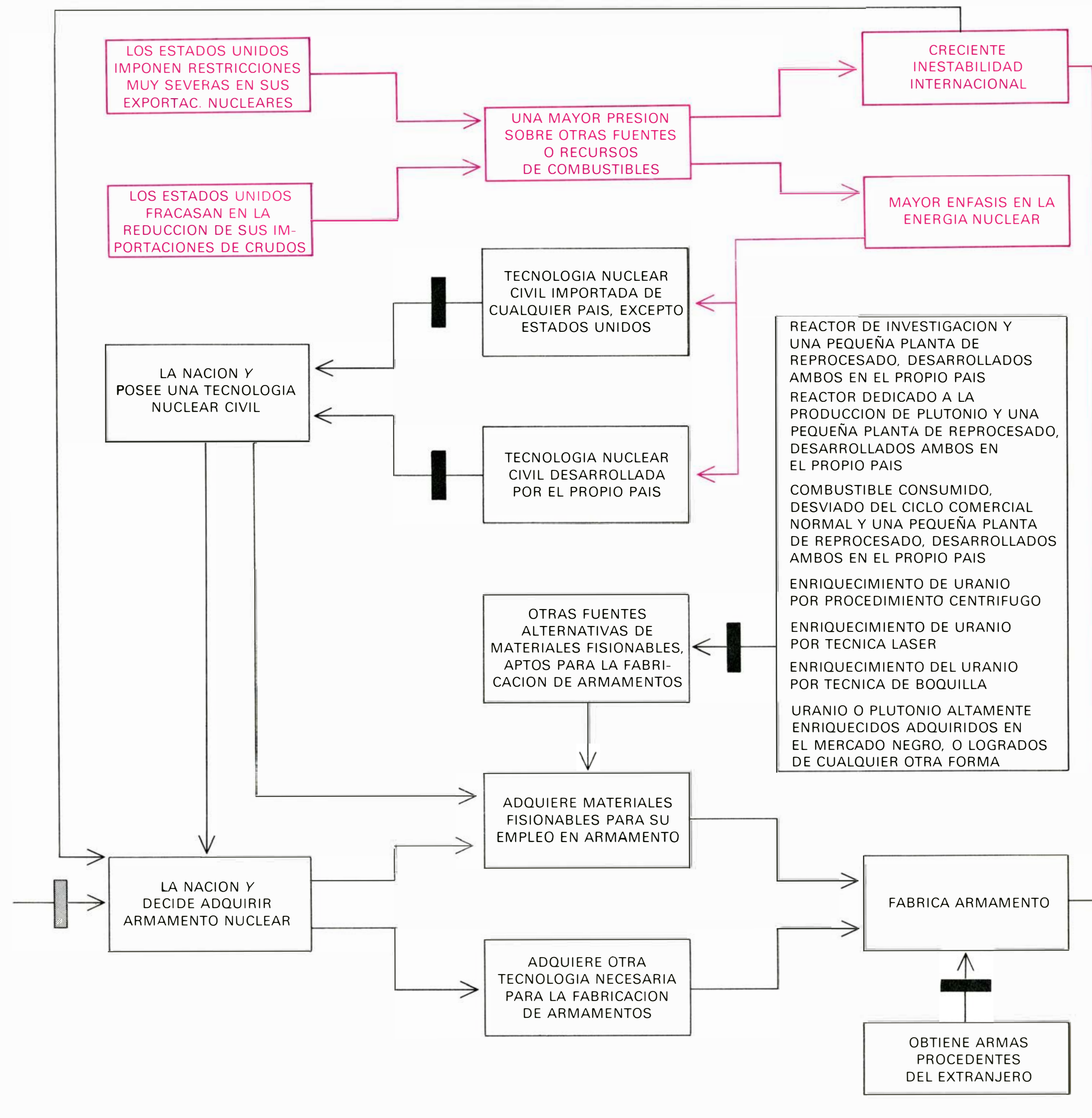
La política restrictiva de los Estados Unidos en relación con las exportaciones (así como también la de otros países abastecedores principales), es vista en muchas partes del mundo como un sistema eficaz para aumentar las desigualdades que siempre han existido –también en el interior del Tratado de No Proliferación– entre los países que poseen armamento atómico y los países que carecen de él. El nuevo hecho demostrativo de la existencia de estas desigualdades es el intento de influir sobre los criterios que haya que seguir en la distribución mundial de ciertas tecnologías pacíficas "sensibles", en especial las tecnologías del reprocesado. En relación con esta política está el nuevo trazado de la línea de separación entre el empleo pacífico y el empleo violento de la energía nuclear y, de acuerdo con ello, la nueva definición propuesta para el término "proliferación". Este último se ha definido tradicionalmente como "la adquisición de armas nucleares". Ahora, sin embargo, la nueva posición norteamericana está siendo interpretada como un intento de volver a definir la proliferación y darle un diferente matiz, en el sentido de que ahora sea la "capacidad" de adquirir armas nucleares. Si este hubiera sido siempre el caso –se dice–, las negociaciones sobre el Tratado de No Proliferación hubieran sido imposibles desde su comienzo.

No estamos intentando determinar si, en realidad, los Estados Unidos han fallado en el cumplimiento de sus obligaciones internacionales legales como miembro del Tratado de No Proliferación al poner en vigor sus criterios sobre exportaciones. Sin embargo, sí observamos que la pérdida de confianza producida en Norteamérica en relación con la eficacia de las garantías y medidas de control internacionales se refleja y reproduce en muchos países no nucleares, por medio de una correspondiente desconfianza sobre la aptitud del Tratado de No Proliferación para proporcionar un entramado legal aceptable en la distribución internacional de las aplicaciones pacíficas y militares de la energía atómica. En estas circunstancias, el edificio que cobija a la totalidad del sistema de no proliferación está agrietado.

Todos los asuntos que aquí se han discutido aparecen como vías desestabilizadoras en nuestra segunda situación-tipo de proliferación nuclear. No solamente el país *Y* encuentra estímulos muy lógicos para establecer en su territorio instalaciones que utilicen combustible nuclear, sino que también este país está tomando conciencia de la existencia de un mundo cada vez más fragmentado y menos seguro. Al sentirse menos seguro en sí mismo, es natural que imagine a los demás países sintiendo lo mismo y, como consecuencia, se vea en la necesidad de aumentar unilateralmente su propia seguridad. La escalada de incertidumbres conduce a una escalada en la inestabilidad internacional; y un programa que inicialmente estaba orientado por los Estados Unidos a disminuir los riesgos de la proliferación nuclear va a producir los efectos contrarios. Norteamérica se va viendo aislada y alejada del curso de la política nuclear mundial

y va viendo disminuir su capacidad de influencia en dicha política.

Podrían señalarse nuevos condicionamientos sobre el tema. Nada hay en este análisis destinado a exagerar el papel que la energía atómica está llamada a desempeñar en la solución de los problemas energéticos mundiales. Este error ha sido cometido con frecuencia anteriormente. Algunos de los problemas con que hoy se enfrenta la industria de la energía nuclear en los países desarrollados no comunistas podrían entenderse –gráficamente hablando–, comparándolos con los efectos de una zancadilla por detrás a consecuencia de un precoz y excesivo optimismo tecnológico. Para la mayoría de los países menos desarrollados, la electricidad generada por la energía atómica no puede llegar a ocupar un lugar relevante a la hora de cubrir las necesidades energéticas durante mucho tiempo. Los costos han crecido de forma alarmante y, además, el tipo y la graduación de la energía proporcionada por las estaciones actuales de energía atómica aparecen menos adecuados para atender a unas estructuras de demanda energética en muchos de estos países, que su acceso a otros sistemas de abastecimiento.



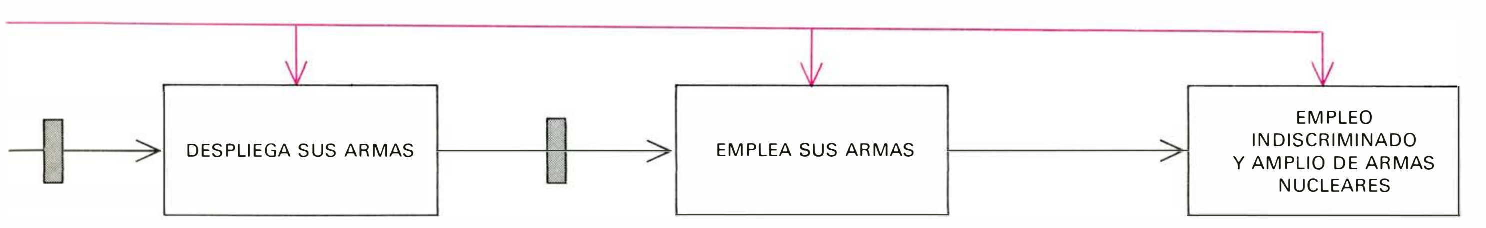

**OTRA SITUACION-TIPO, de mayor complejidad, necesaria para poder representar de una forma más realista los probables efectos que una política norteamericana de exportaciones nucleares demasiado restrictiva podría provocar sobre la totalidad del problema estabilidad internacional-proliferación de armas nucleares. La principal línea de decisión seguida por la nación *Y* para la puesta a punto de una capacidad en armas nucleares es la misma que en el anterior diagrama, de igual forma que son los mismos otros elementos. Sin embargo, en este caso las entradas verticales o respuestas ante las deciciones de *Y* se inician con las nuevas restricciones norteamericanas en sus exportaciones nu-**

Por otra parte, en algunos países en vías de desarrollo, en los que se intenta que la energía nuclear desempeñe un papel destacado, los objetivos para su desarrollo integral aparecen con frecuencia demasiado ambiciosos y con pocas probabilidades de poder ser llevados a cabo con éxito. Se ha expresado el temor de que la tecnología de la energía nuclear pudiese exacerbar de forma peligrosa la rivalidad existente entre las diversas élites políticas, industriales y tecnocráticas y de que pudiese igualmente ensanchar el abismo existente entre las referidas élites y el resto de la población. Hasta ahora, los abastecedores no han modificado, al menos perceptiblemente, ninguna de sus normas de "venta dura", ya que éstas podrían contribuir a la larga a corregir la inestabilidad política, de consecuencias imprevisibles en el terreno internacional, y desde luego no resulta probable que tales autorrestricciones aparezcan en el futuro. El asunto aquí no es, por supuesto, que las naciones industrializadas proveedoras deban decidir lo que es bueno para el desarrollo de los países más pobres y, como consecuencia, imponer restricciones en sus exportaciones, sino que la tecnología nuclear puede ser "sensible" por muchas razones, independientemente de que pueda resultar de utilidad en el acceso cada vez mayor a unos materiales adecuados para la fabricación de armamento.

Concluiremos por ello afirmando que los temas defendidos de forma convencional han ido resultando, uno tras otro, completamente inadecuados. Los motivos primitivos fueron desapareciendo a lo largo de nuestra discusión, y es natural que así fuera; eran objetivos a lograr, más bien que auténtica política. Ambos son necesarios; el despreciar la dura labor de crear y desarrollar normas puede causar muchos quebraderos de cabeza, ya que la visión original, de altos vuelos, va quedando borrada poco a poco por un torrente de acontecimientos y únicamente permanecen, en definitiva, las consecuencias.

¿Qué es, pues, lo que hay que hacer? Para contestar a esta pregunta hemos tenido que suponer que pueden ser resueltos otros muchos asuntos relacionados con la energía nuclear. Para nosotros, los tres problemas de más envergadura parecen estar en la seguridad en los reactores, la manipulación de los residuos y la prevención del posible "juego sucio" en materia nuclear. Aunque no hemos tratado de estos asuntos, su gravedad parece indudable. Nuestro análisis y las consiguientes recomendaciones resultarían faltos de lógica tan sólo con que los Estados Unidos y casi todos los demás países decidieran prescindir de la energía nuclear. Aún en el caso hipotético de que la energía nuclear desapareciese en Norteamérica, ni los actuales reactores ni tampoco los nodriza seguirían el mismo ejemplo en muchos otros lugares del mundo. Si las actividades de Europa Occidental y de Japón nos parecen poco convincentes, pensemos únicamente en la Unión Soviética y sus aliados de Europa Oriental: también ellos desarrollan la energía nuclear y sólo dejan reservadas para la Unión Soviética las actividades más delicadas. Norteamérica debe dejar de actuar como si la energía nuclear fuese a desaparecer, o como si las consecuencias de su desaparición fuesen casi despreciables.

La Administración ha comenzado a enfrentarse con algunos de los cambios necesarios; ejemplos de este cambio de actitud han sido sus pasos graduales para llegar a una política más flexible, un empeño más firme en la obtención de las necesarias cantidades de combustible nuclear y algunas sugerencias para organizar e instalar unos depósitos internacionales para el almacenamiento de los combustibles consumidos. A causa de las significativas reducciones previstas en la demanda de energía y también de las previsiones hechas sobre capacidad nuclear instalada, los próximos años se nos aparecen como un período de "gracia", o de "la última oportunidad" –visto quizá por exceso en los Estados Unidos y por defecto en el extranjero–, durante el que podrán realizarse reparaciones fundamentales en el edificio de la política y de los objetivos nucleares. El período puede durar hasta un decenio, pero difícilmente podrá ser mucho más largo, ya que estará limitado por las consecuencias de la inflexible presión ejercida sobre el resto de las fuentes de energía. Este período de tiempo resulta suficientemente largo, desde un punto de vista técnico, para desarrollar los necesarios cambios en los actuales procesos del combustible, suficientemente largo quizá para poder proyectar algún nuevo tipo de proceso, e incluso para que los reactores y otras instalaciones puedan emplear el combustible obtenido por medio de estos nuevos procesos, pero esto último requeriría unas decisiones mucho más firmes y una ejecución mucho más diligente (y que resultaría más cara) de las que estamos acostumbrados a ver. Tanto la preparación del combustible fisionable a partir de un material nuevo o reprocesado (punto conflictivo en el ciclo del combustible), como el reprocesado del combustible consumido, deben ser considerados con mucho cuidado y no solamente debe serlo este último aspecto. Como acabamos de decir, creemos que el punto conflictivo en el ciclo del combustible –por ejemplo, el enriquecimiento del uranio natural– constituye un incentivo muy




**cleares, unidas al fracaso de los Estados Unidos en sus intentos de reducir apreciablemente sus importaciones de crudos. Algunas otras vías lógicas, representadas en color, muestran el posible desarrollo de los acontecimientos como consecuencia de aumentar el número y valor de los estímulos que aparecerían ante la nación *Y*, no solamente para seguir adelante con su propio programa civil de energía nuclear –incluida la tecnología correspondiente al enriquecimiento del uranio, las plantas de regeneración del combustible agotado y los reactores nodriza– sino también, quizá, para reaccionar ante la inestabilidad internacional adoptando la decisión de incorporarse al "club del armamento nuclear".**

sensible para la proliferación. La existencia de unos 200 reactores energéticos repartidos por todo el mundo y trabajando de acuerdo con el actual proceso del combustible debe ser igualmente tomado en consideración. Y, además, resultan muy limitadas las mejoras tecnológicas que podrían serles aplicadas.

Todas estas circunstancias provocarán sin duda importantes demandas en los próximos diez años, o quizás algo más tarde. Ello hace necesario acometer algunos reajustes en los acuerdos entre las naciones, no sólo con respecto a los ciclos que se desarrollan actualmente en el combustible nuclear, sino también en relación a muchos otros temas. El tiempo es corto, tanto para introducir modificaciones tecnológicas, como para poner en vigor nuevas normas internacionales. Cualesquiera que sean los resultados de lo primero, lo segundo constituye una parte indispensable de los esfuerzos a realizar en la lucha con los problemas de la proliferación, y con la escasez de energía. Aunque los propósitos de la Administración han levantado muchos problemas, también han tenido éxito en el sentido de provocar una nueva sensación de urgencia en la situación. Resulta esencial no permitir que este capital llegue a evaporarse.

En relación con los ciclos actuales de combustible y con otros asuntos relacionados con la energía nuclear durante el próximo, o los dos próximos decenios, tenemos cinco recomendaciones que ofrecer:

1. La energía nuclear debe ser mantenida en activo en Norteamérica, al menos como un factor o garantía de seguridad a largo plazo; esto representa, no sólo poder continuar adelante con el desarrollo de los reactores de agua ligera, sino también poder seguir avanzando con posibilidades de éxito en el desarrollo de un reactor nodriza. Las centrales-estación de energía solar y la fusión controlada constituyen hoy por hoy únicamente posibilidades a largo plazo; el petróleo es solamente una fuente de energía a corto plazo y nosotros personalmente tenemos poca fe en las posibilidades del carbón a largo plazo.

2. Para disminuir la incertidumbre sobre el porvenir de la industria norteamericana que utiliza electricidad, así como la de otros tipos de industria, el Gobierno Federal debería dar varios pasos progresivamente. En primer lugar, debería reafirmar que el reprocesado del combustible nuclear agotado va a retrasarse, pero de ninguna forma a abandonarse. En segundo lugar, el Gobierno Federal debería comprometerse con la referida industria que emplea la electricidad a revisar su política nacional sobre el reprocesado en tanto madura la controversia actual sobre este tema y, desde luego, en un plazo no superior a cinco años; se incluiría en esta revisión un impuesto sobre los abastecimientos previstos de uranio que ayudaría a la financiación de algunos programas, tales como el actual de valoración de los recursos nacionales de uranio. En tercer lugar, debería simplificarse la actual complejidad y prolijidad en los trámites para la obtención de licencias para la instalación de plantas de energía nuclear, obligando por el contrario a que la Comisión Reguladora Nuclear hiciese estos trámites más dificultosos en los casos de concesión de licencias para los segundos tratamientos. El proyecto para la concesión de licencias nucleares, actualmente en estudio, parece estar enfrentándose con una serie de formidables obstáculos a lo largo de las diferentes etapas del proceso legislativo y, en cualquier caso, parece que en su actual redacción únicamente se considera alguno de estos puntos. Por último, el Gobierno Federal debería cargar sobre sus espaldas la totalidad del peso que representa la manipulación del combustible agotado y ofrecer garantías de que asumirá la responsabilidad sobre este combustible tan pronto sea extraído de los reactores de energía. Esto incluye el reprocesado del combustible agotado, si se toma una decisión al respecto y tan pronto esta decisión haya sido adoptada. Ningún otro sector como el Gobierno Federal dispone de unas perspectivas mejores a largo plazo para la planificación y puesta en marcha de las instalaciones más adecuadas. La industria química, en particular –sobre la que se podría pensar que pudiese recaer esta labor– cuenta tradicionalmente con un reembolso de sus inversiones en el plazo de muy cortos años y por tanto hace demasiados descuentos en los beneficios a largo plazo para poder compensar la naturaleza a largo plazo de esta labor, en especial la manipulación y almacenamiento de los residuos.

3. Norteamérica debería ofrecerse para examinar junto con otras naciones los costos y beneficios que podrían producirse para la comunidad internacional si se completase la planta de reprocesado –con sus trabajos paralizados actualmente–, situada en Barnwell, y se la hiciese funcionar como una instalación de carácter internacional. Los principales objetivos a conseguir con tal proyecto serían mejorar la experiencia sobre la

tecnología del reprocesado comercial, poder comprobar la eficacia de las garantías de seguridad internacionales, así como poner de manifiesto la posibilidad institucional para el establecimiento de una cooperación de tipo internacional para obtener servicios relativos al proceso del combustible.

4. Deberían intensificarse los esfuerzos para aumentar la seguridad de los abastecimientos de uranio a nivel mundial, así como de los servicios de enriquecimiento. En el interior del país no debería consentirse que las diferencias existentes entre los distintos departamentos ministeriales puedan interferir en la tarea básica y primordial de volver a colocar a los Estados Unidos en el papel de un seguro proveedor de combustible de uranio enriquecido.

5. En todas estas actividades se observa la necesidad de contar con una organización internacional. Nos parece que no existe ninguna que esté mejor preparada para ello que la Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA), y creemos que esta organización debería fortalecerse de una manera importante, de forma que pudiese ejercer permanentemente una labor de control y de inspección de las instalaciones más sensibles. La solución no está, sin embargo, en fortalecer o simplemente aumentar el número de organizaciones. Por ejemplo, existe el peligro de que las restricciones en la exportación de determinados sistemas nucleares pueda torpedear el Tratado de No Proliferación sin que la IAEA pueda hacer nada para impedirlo.

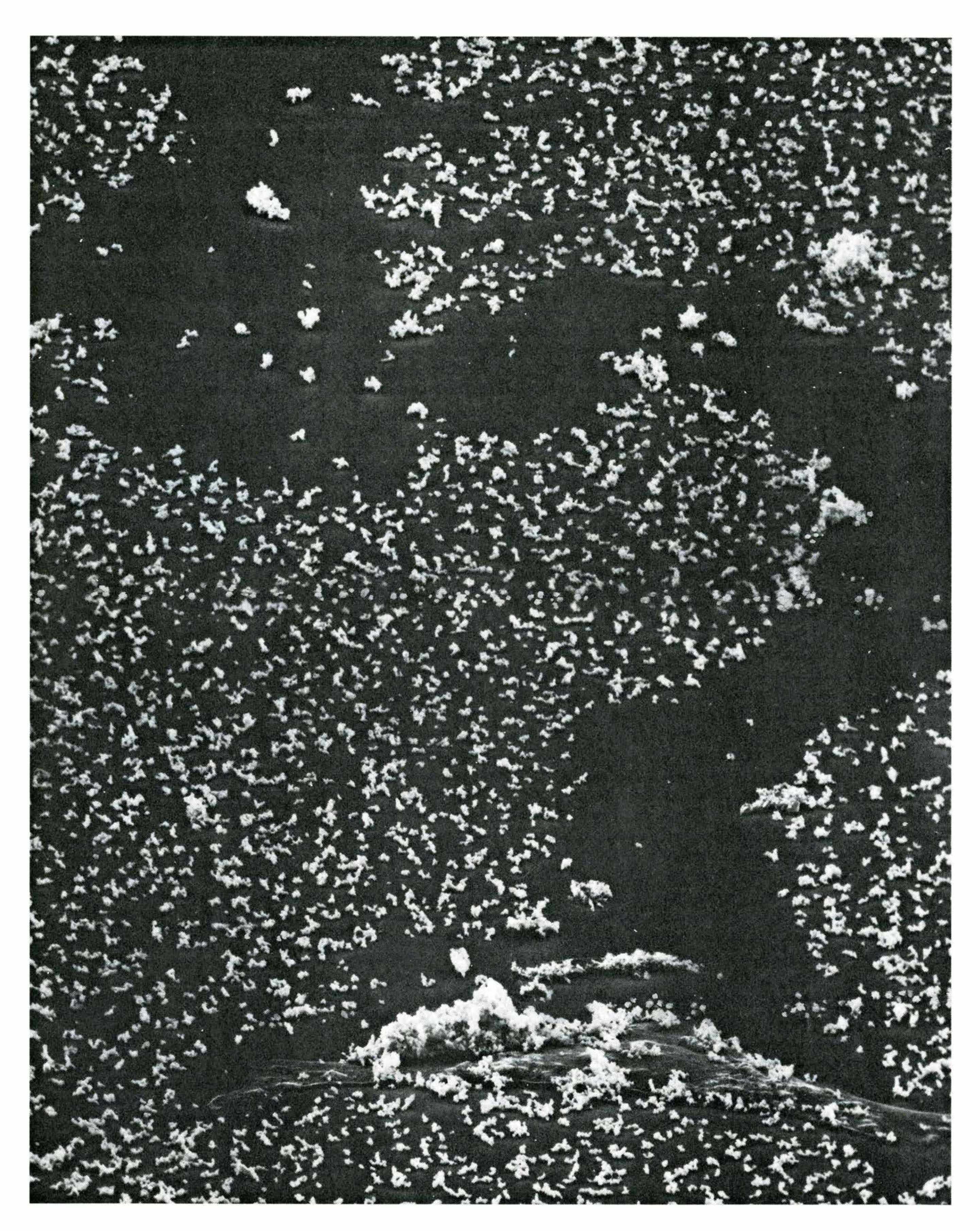
Más allá de estas recomendaciones, podemos vislumbrar otras que aparecen destacadas a distancia. En primer lugar, resulta digno de anotar que los diagramas de causas y efectos tratados de forma convencional difieren de los que hemos confeccionado para este trabajo. Nuestro enfoque del asunto ha sido casi por completo de carácter internacional, como conviene a este tipo de problemas. La actuación de los Estados Unidos ha sido demasiado concentrada en sí misma, poco sensible ante los problemas de otras naciones, así como desconocedora de sus propias posibilidades disuasorias.

Casi al principio de este artículo decíamos que la Administración había intentado insuflar una vida nueva en las facetas más importantes del tema de las armas nucleares. Si los gobiernos y los pueblos sienten tanta preocupación ante los riesgos que implican una futura proliferación posible, ¿cuánto mayor debería ser este temor al pensar en el enorme número de armas nucleares que se encuentran ya dispuestas y desplegadas en estos momentos? Alguien acostumbrado a vivir al borde de un abismo no debería malgastar sus esfuerzos tratando de evitar pequeñas zanjas. La verdadera amenaza de las armas nucleares se ve de nuevo con más claridad que antes en la luminosa perspectiva que representa la comparación de miles de megatones ya existentes y listos para su empleo por un lado, mientras que por el otro solo hay unos pocos e hipotéticos kilotones.

Esto nos conduce al tema más amplio de la paz y la estabilidad internacionales. En la búsqueda a escala mundial de las vías para llegar a una sociedad más justa y estable, a muchos observadores ha parecido claro que una paz en la cual el mundo está dividido todavía con mayor rigor entre "los que tienen" y "los que no tienen", ni puede ser justa ni tampoco podrá ser estable, tanto si lo que motiva dicha división tiene un matiz social, económico o (como aquí) aparentemente tecnológico. Tal decisión no sólo acabará siendo derrotada a lo largo del tiempo; peor aún, constituye un grave error.

Nuestra propuesta consiste en advertir que la verdadera solución a largo plazo, no sólo del problema de la energía nuclear, sino de otros problemas de mayor envergadura en relación con la inestabilidad internacional está, no en fomentar aún más las divisiones, sino precisamente en todo lo contrario: en una mutua y cooperativa interdependencia internacional. Desde el momento en que las naciones hayan de depender unas de otras perderán más si se deciden a marchar por separado que si se mantienen asociadas. Nuestro análisis ha permitido ver que esta asociación debe incluir a los países en vías de desarrollo, ya que muchos de ellos si se sienten excluidos serían muy capaces de trastornar el orden internacional realizando acciones tales como tratar de conseguir adquirir armas atómicas.

Todo esto no será fácil, pero por otros procedimientos a lo único que se ha podido llegar es a una escalada en los armamentos. Esta asociación de tipo internacional debería abarcar lógicamente conceptos como alimentación, atención y asistencia sanitaria y muchos otros aspectos en que los Estados Unidos pueden aportar una considerable contribución. Solamente así tendremos la oportunidad de poder contestar de forma constructiva a la pregunta que no podemos retener por más tiempo: ¿por qué los pueblos tratan de fabricar armas nucleares con preferencia a cualquier otra cosa?



**LA ESTELA LIBRE DE PARTICULAS** dejada en su migración por una célula, procedente de un cultivo de tejidos *(en primer plano)*, atravesando un sustrato de vidrio cubierto por una fina capa de partículas de oro coloidal, queda patente en esta microelectrografía de barrido realizada por el autor en el laboratorio de Cold Spring Harbor. La célula ingiere las partículas áureas que encuentra en su camino hasta saturar su capacidad fagocitaria; luego, las partículas empiezan a acumularse en el exterior de la membrana celular formando grandes bultos que, de vez en cuando, se deshacen y queda depositado el oro cerca de la estela. De este modo, la célula migrante crea un registro gráfico de sus paseos, que se podrá examinar más adelante con el microscopio óptico. El autor denomina fagocinético a este nuevo enfoque dado al estudio de la migración celular, puesto que implica la participación de la fagocitosis (ingestión de partículas) y de la cinética (estudio del movimiento).

# La estela de células en movimiento

*Cuando se colocan células migrantes de un tejido sobre un sustrato cubierto por una fina capa de partículas de oro, van eliminando dichas partículas y dejando así un rastro gráfico de sus movimientos, el cual nos revela un grado de orden sorprendente*

Guenter Albrecht-Buehler

La capacidad que poseen las células animales para desplazarse de un lugar a otro desempeña un papel fundamental en muchos fenómenos biológicos. El desarrollo embrionario depende de la migración de poblaciones enteras de células hacia localizaciones bien definidas y en momentos también muy exactos. La defensa del cuerpo contra las bacterias y otros invasores precisa del movimiento de glóbulos blancos a través de las paredes de los vasos sanguíneos al objeto de defender los tejidos acosados. La curación de las heridas implica también la migración de células que hagan de puente y acaben por cerrar la herida. En otro orden, podría suponerse que la mayoría de los cánceres son crecimientos relativamente inofensivos si no fuera por la migración de las células tumorales a través del organismo, formándose una innumerable cantidad de tumores nuevos.

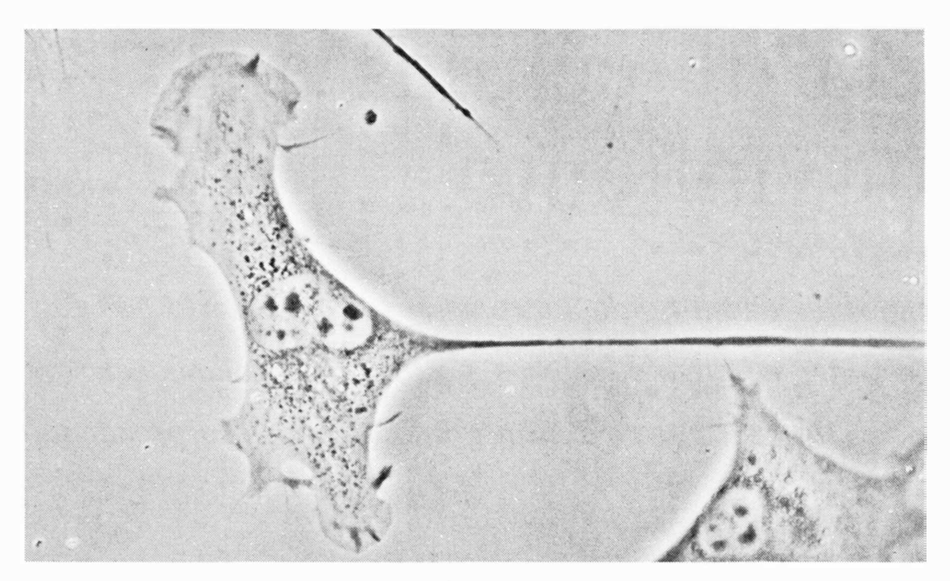
Sólo en casos muy excepcionales puede observarse el movimiento de células en el interior de los organismos, por ejemplo, durante el desarrollo del embrión del erizo de mar, y aun entonces se consigue ello con una resolución microscópica muy baja. En consecuencia, quizá resulte mejor estudiar la migración celular fuera de los organismos, utilizando células cultivadas en cápsulas de vidrio o de plástico. En primera instancia, el movimiento de las células animales cultivadas aparece como un fenómeno esencialmente aleatorio, a la merced de los caprichos de las poderosas fuerzas que dominan el mundo microscópico. Las células migrantes, prácticamente ingrávidas, se hallan sometidas al violento movimiento browniano, a fuertes campos eléctricos, a tensiones superficiales, a presiones osmóticas y a las fuerzas liberadas por reordenaciones moleculares. A pesar de lo cual, el análisis de las vías de las células en movimiento ha puesto de manifiesto una lógica y un orden sorprendentes en el comportamiento celular.

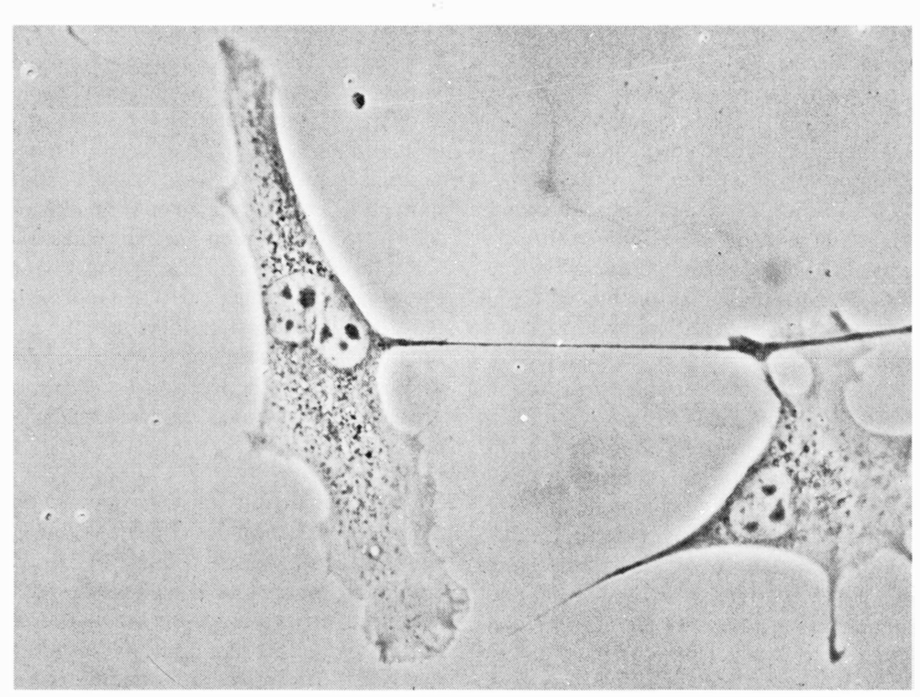
La técnica de aislamiento de células animales a partir de tejidos embrionarios para su posterior cultivo en el interior de cápsulas, en las que hay un medio nutritivo especial, es un método conocido ya desde 1907 y se ha venido practicando de forma usual en muchos laboratorios biológicos. Una vez las células han sido separadas del tejido, apartadas unas de otras por un enzima proteolítico y suspendidas en el líquido nutriente, se reducen a minúsculas esferas. Cuando se las transfiere a una cápsula de vidrio o de plástico, quedan adheridas al fondo, se aplanan y empiezan a crecer y a dividirse hasta que, en pocos días, cubren toda la superficie disponible. Si se desea que sigan creciendo, se les ha de dar una mayor área superficial y, luego, distribuirlas en varias cápsulas nuevas. Si después de haber sido transferidas repetidas veces, las células no cambian de morfología ni dejan de crecer, se puede considerar que se ha establecido una línea celular pura.

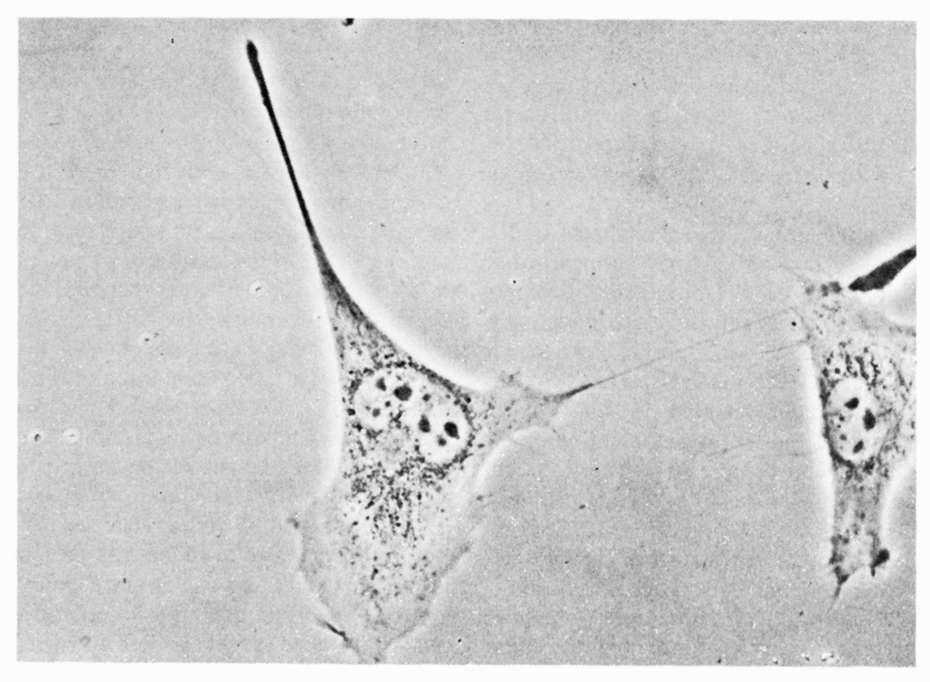
La mayoría de las células que estudié, mientras estaba en Cold Spring Harbor trabajando en el laboratorio, procedían de una línea celular establecida hace uno 15 años por George J. Todaro y Howard Green, de la facultad de medicina de la Universidad de Nueva York. Debido a que el procedimiento para establecer la línea era transferir $3 \times 10^5$ células a cápsulas nuevas cada tres días, las células se denominaron 3T3. Se parecen a los fibroblastos, es decir, a las células que ponen en contacto a otras células en los tejidos animales. Cuando se pretende estudiar el movimiento celular se colocan las células sobre la ventana horizontal de una cámara de observación, la cual contiene un líquido nutritivo que se mantiene a 37 grados Celsius. La cámara es lo suficientemente delgada como para someterla a examen en el microscopio óptico: se pueden ver las células vivas a través de la ventana. Pero si lo que se desea es analizar de cerca la morfología de las células cuando no se mueven, se cultivan éstas sobre otro tipo de soporte y se procede a prepararlas para microscopía electrónica de transmisión o de barrido.

Podemos definir el movimiento de las células animales como un cambio continuo de la forma celular; la migración sería, pues, una secuencia de estos cambios. Sin embargo, los cambios son tan lentos que se han de tomar fotografías con cierto intervalo de tiempo entre ellas para que los cambios entren dentro del margen de percepción de movimiento habitual del observador. El estudio de la motilidad de las células animales consiste, por tanto, en analizar la lógica y los mecanismos de un objeto que, al autodeformarse, se va moviendo lentamente.

A la hora de acometer el análisis del movimiento celular podemos seguir dos enfoques fundamentales. Uno es el estudio de la estructura y modos de acción de los elementos estructurales rígidos del interior de la célula y de las prolongaciones de su membrana externa que, en definitiva, determinan la morfología del organismo en cada momento. El otro enfoque consistiría en centrar la atención sobre las funciones biológicas de estos elementos, verbigracia: sus respuestas al medio que rodea a la célula, las interacciones que existen entre unos y otros y las normas que rigen la secuencia temporal de sus acciones. Por mi parte,







seguí un enfoque primariamente funcional en mis experimentos, haciendo visibles las vías que tomaban las células en movimiento activo y buscando luego las regularidades que presentaban tales trayectorias celulares.

Para visualizar las vías de las células hay que aprovechar la curiosa tendencia que presentan determinados tipos de células (entre las que están las 3T3) a fagocitar o ingerir partículas diminutas de oro coloidal (o cualquier otro tipo de partículas). A tal fin, se prepara un sustrato bañado con partículas de oro, por reducción de una sal áurea en solución acuosa; al no disolverse, las partículas áureas precipitan y forman una capa densa uniforme sobre la superficie de un cubreobjetos de vidrio. Luego, se sustituye la solución por un medio de cultivo y se siembran las células sobre el cubreobjetos bañado en oro. Al migrar las células, remueven e ingieren las partículas que encuentran en su camino, dejando atrás una estela libre de partículas que se puede identificar perfectamente como una línea negra cuando se mira el cultivo al microscopio a bajo aumento y con iluminación de campo obscuro.

Debido a que la formación de estas estelas implica una combinación de fagocitosis y de cinética (estudio del movimiento), propuse para la misma la denominación de fagocinética. La ventaja que presentan los gráficos fagocinéticos para el estudio del movimiento celular animal es que un gran número de células individuales registran automáticamente su propia migración, sin que sea necesaria una observación continuada del investigador. Es evidente que, en comparación con el medio interno de un organismo, el medio de la fina capa de oro es bastante poco natural, pero no lo es mucho más que los sustratos desnudos de vidrio o de plástico. Yo creo, por tanto, que las ventajas experimentales que ofrecen las estelas fagocinéticas para el estudio del comportamiento celular pesan más que las dudas que uno pueda tener en cuanto a la exposición de las células a las partículas áureas.

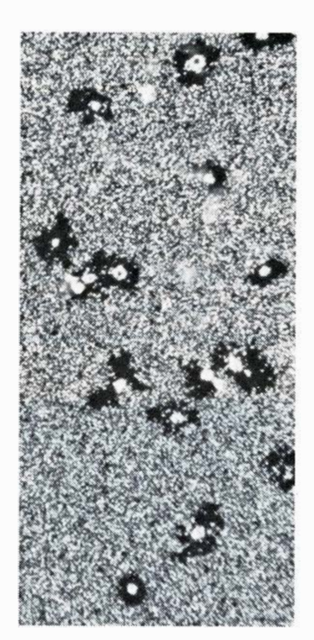
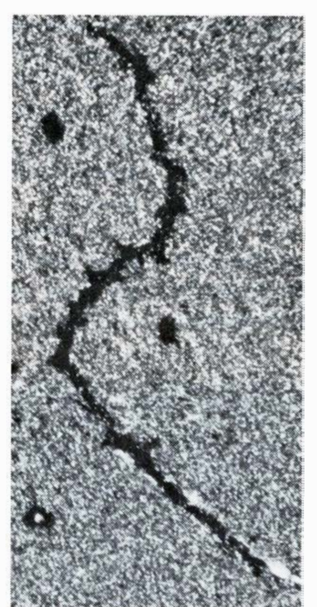
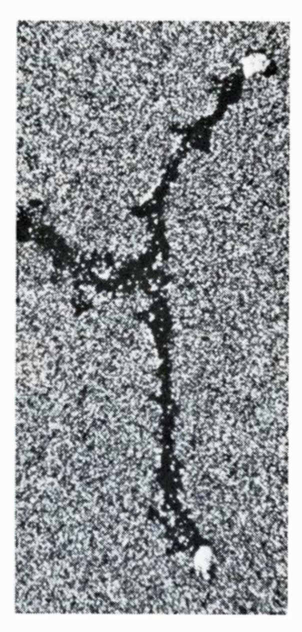
**CAMBIO DIRECCIONAL que realiza una célula migrante en un cultivo de tejidos, en un intervalo de dos horas. La célula posee una "cola"** *(estructura obscura en el marco superior)* **y un extremo frontal que parece una lámina ondulada. Cuando quiere cambiar de dirección, la célula muda la localización de su extremo frontal, pasándolo aquí a su parte inferior izquierda mientras reabsorbe la cola; luego, desarrolla una cola nueva en el punto donde se hallaba anteriormente el extremo frontal. La orientación del núcleo celular** *(que se indica por unas manchas negras)* **apenas varía al girar la célula, lo que sugiere que el núcleo se mueve paralelamente al citoplasma circundante. El aumento es de 850 diámetros.**

Cuando se siembran células esféricas 3T3 sobre un sustrato cubierto de oro, una de las primeras cosas que hacen es formar varias prolongaciones de su membrana externa, principalmente en forma de bastones puntiagudos, que se llaman filopodios. Los filopodios se mueven de un lado a otro como unos palos rígidos hasta conseguir adherirse al sustrato, a pocas micras del cuerpo celular. Si se hallan en presencia de partículas de oro, los filopodios entran en contacto con ellas y dejan de moverse, retrayéndose al cabo de un minuto, aproximadamente, hacia el cuerpo celular y arrastrando consigo las partículas de oro hasta que queden ingeridas por la célula. El proceso continúa hasta que la célula se haya llevado casi todas las partículas de un radio circundante. Luego, la célula emite nuevas prolongaciones y estos filopodios se adhieren a la superficie, aplanándose la célula en la región limpiada.

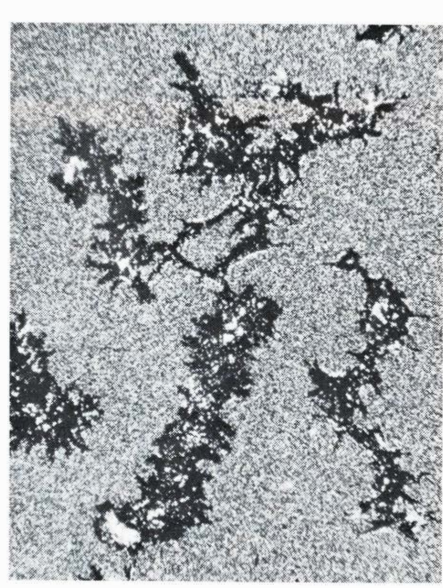
Una vez se ha aplanado la célula, empieza su migración, llevándose las partículas por delante y dejando una estela que surca las que han quedado. La célula remueve las partículas con varias de sus prolongaciones como el lamelipodio, de forma laminar, y las vejigas hemisféricas, y las transporta a través de su membrana en dirección al núcleo celular. Las partículas quedan englobadas y reunidas en un anillo alrededor del núcleo y, cuando ya se ha alcanzado el grado de saturación aparente de la capacidad celular para ingerir las partículas, éstas se acumulan formando unos bultos en la superficie celular externa. De vez en cuando, los bultos se abren y el oro se deposita en la vecindad de la estela.

Aún no se conoce el destino de las partículas ingeridas. Si vuelven a ser expulsadas al exterior, deben ser sustituidas necesariamente por partículas de ingestión reciente, ya que nunca desaparece el anillo de partículas formado alrededor del núcleo celular. Se podría pensar que la sobrealimentación de las células con partículas áureas podría dañarlas, pero personalmente no he encontrado efectos nocivos, ni siquiera tras un contacto de varias semanas. Cuando la célula se divide, las partículas de oro interiorizadas quedan repartidas de forma igual entre las dos células hijas. Si la célula se divide después de haber formado una estela, la estela se ramifica, pues las dos células hijas migran en direcciones diferentes, siguiendo vías separadas. En resumen, los tres tipos principales de movimiento celular animal que uno puede observar en células cultivadas toman el aspecto de tres tipos de registros gráficos en la fina capa de partículas áureas sobre el sustrato: el aplanamiento de la célula queda representado por un anillo libre de partículas; la migración, por una línea carente de ellas; y, la división celular, por la ramificación de dichas líneas.

¿Por qué razón las células recogen las partículas de oro y las ingieren? Al parecer, los filopodios examinan la firmeza de un sustrato intentando tirar del primer objeto sólido que encuentran, de un modo similar al que emplearía un alpinista tanteando la seguridad de su próximo punto de apoyo para no exponer la vida. Cuando la partícula queda suelta, el mecanismo retráctil que genera la fuerza examinadora del sustrato parece estirar de la partícula hasta tenerla encima mismo del cuerpo celular. Desde luego, esta interpretación resulta muy sugestiva porque concede a la célula animal aislada una manera sencilla de determinar si un objeto dado, con el que entra en contacto, resulta o no adecuado como punto de apoyo.

**LOS MAPAS formados por las trayectorias de células cultivadas migrantes en un sustrato cubierto de partículas de oro es lo que se observa en estas microfotografías. La iluminación de campo obscuro hace que las estelas aparezcan en negro y que las células repletas de partículas brillen intensamente al final de dichas estelas. Existen tres tipos básicos de estelas celulares: el aplanamiento celular, representado por anillos libres de partículas *(izquierda)*; la migración, que es una estela linear continua *(centro)* y la división, que forma una estela ramificada *(derecha)*.**

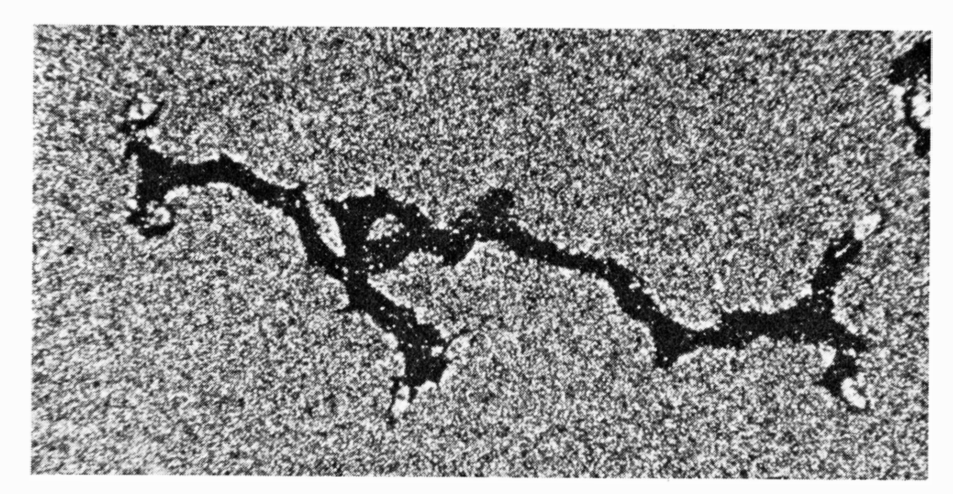
**ESTAS ESTELAS SON CARACTERISTICAS de diferentes líneas celulares de tejidos cultivados, lo que hace pensar que la migración celular no puede ser un fenómeno aleatorio. Las estelas suaves de la izquierda se formaron durante un período de dos días con células 3T3 cultivadas; las estelas "decoradas" de la derecha resultan de células 3T3 transformadas en células cancerosas por infección con el virus polioma. Las "espinas" de estas estelas sugieren que las células transformadas por el polioma solían moverse lateralmente respecto a la dirección de su migración.**

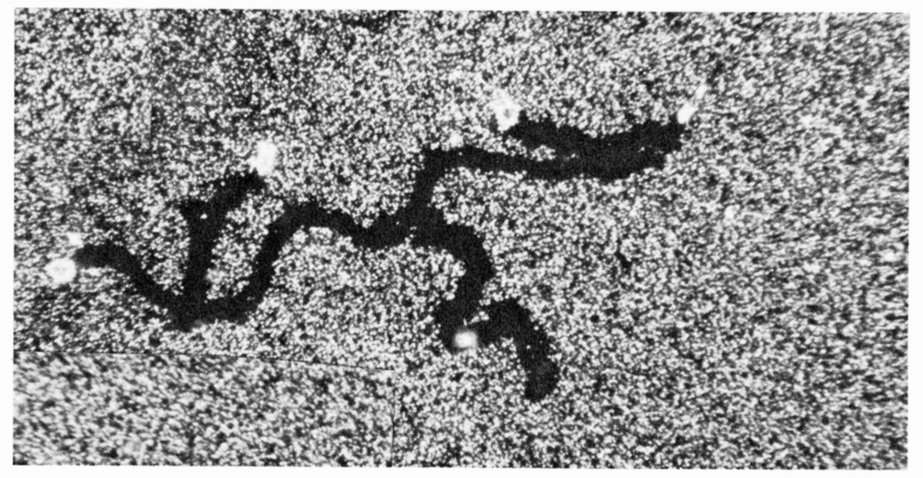
Con el fin de comprobar esta hipótesis, sembré células sobre un sustrato al que se habían unido firmemente las partículas áureas, a cierta distancia de la localización del organismo. Cuando los filopodios se unieron a las partículas de oro, al parecer las encontraron apropiadas como punto de anclaje y el cuerpo celular empezó a extenderse en dirección a las partículas. Tan sólo era necesario que las extremidades de los filopodios entraran en contacto con las partículas áureas fijadas para que comenzara a moverse el cuerpo celular, hecho que está en concordancia con la hipótesis de que la función primaria de los filopodios es examinar la solidez del sustrato circundante.

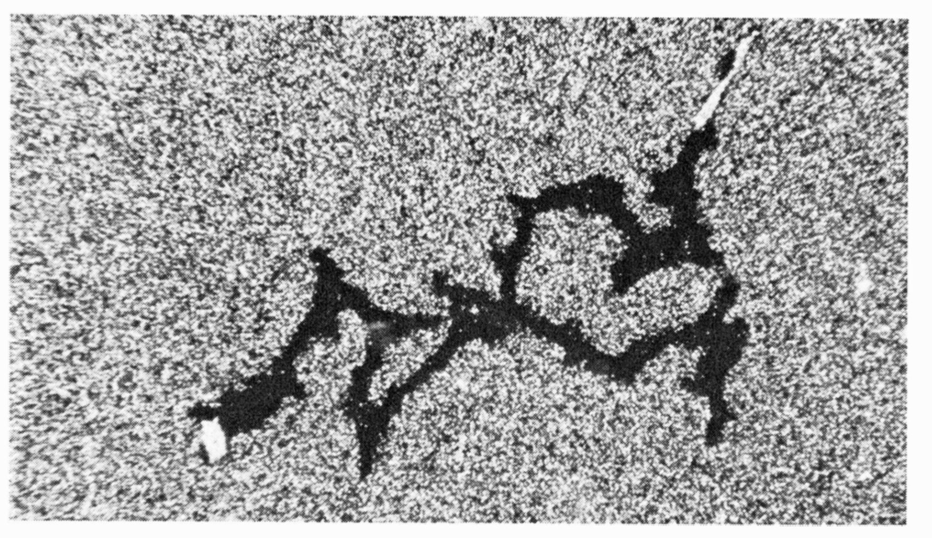
Al observar estelas fagocinéticas dejadas por diferentes células de una misma línea celular, me encontré con que diferían no tan sólo en su forma global sino también en algunos de sus detalles. Por ejemplo, algunas estelas eran más o menos de línea suave; otras, en cambio, estaban decoradas con "espinas" que sobresalían a cualquiera de ambos lados, lo que inducía a pensar que estas células se habían movido lateralmente repetidas veces durante su migración. Las diferencias eran todavía más sorprendentes, en la forma conjunta de la trayectoria, entre las distintas líneas celulares, verbigracia, entre las células 3T3 transformadas por virus, los fibroblastos humanos y las células epiteliales de mono; por ello, y contrariamente a las hipótesis en vigor, la migración de las células animales cultivadas no apoyaba la hipótesis de un fenómeno aleatorio. Al fin y al cabo, las trayectorias aleatorias se deberían parecer más o menos todas, en líneas generales, al margen de cuáles fueren sus fuerzas generadoras.

Pero lo que nos dio una base todavía más firme para pensar en la migración celular como en un fenómeno debido al azar no fue la observación de las estelas ramificadas, trazadas por células en proceso de división. Al comparar los principales cambios direccionales a lo largo de la estela dejada por una célula hija con respecto a los de la otra, comprobé que una de las trayectorias era frecuentemente una imagen especular de la otra, ¡aunque ligeramente distorsionada! Se dan también casos en que las estelas son reflejos mutuos casi perfectos; a menudo ocurre que, para hallar la relación, una tiene que expandir mentalmente la estela de la célula hija más "lenta". Por tanto, la simetría especular es más topológica que no propiamente literal.

Encontré una simetría especular en un 40 por ciento de las estelas ramificadas, una identidad casi perfecta en otro 20 por ciento y una ausencia de correlación en el 40 por ciento restante. Aunque cabe pensar que son muchas las fuerzas externas que actúan sobre las células migrantes, por lo que las estelas ramificadas de las células hijas podrían parecer no estar relacionadas, sólo hay en realidad dos explicaciones de la existencia de ramas especularmente simétricas o idénticas: o bien las células hijas se hallan en auténtica migración siguiendo un orden de estrecha relación, o bien el fenómeno resulta de una coincidencia de puro azar. Uno de los métodos que existen para comprobar el papel del azar en situaciones de este tipo es idear un programa Monte Carlo para ordenador, generador de números aleatorios que determinen las distancias y los ángulos correspondientes a los cambios direccionales consecutivos de unas estelas celu-







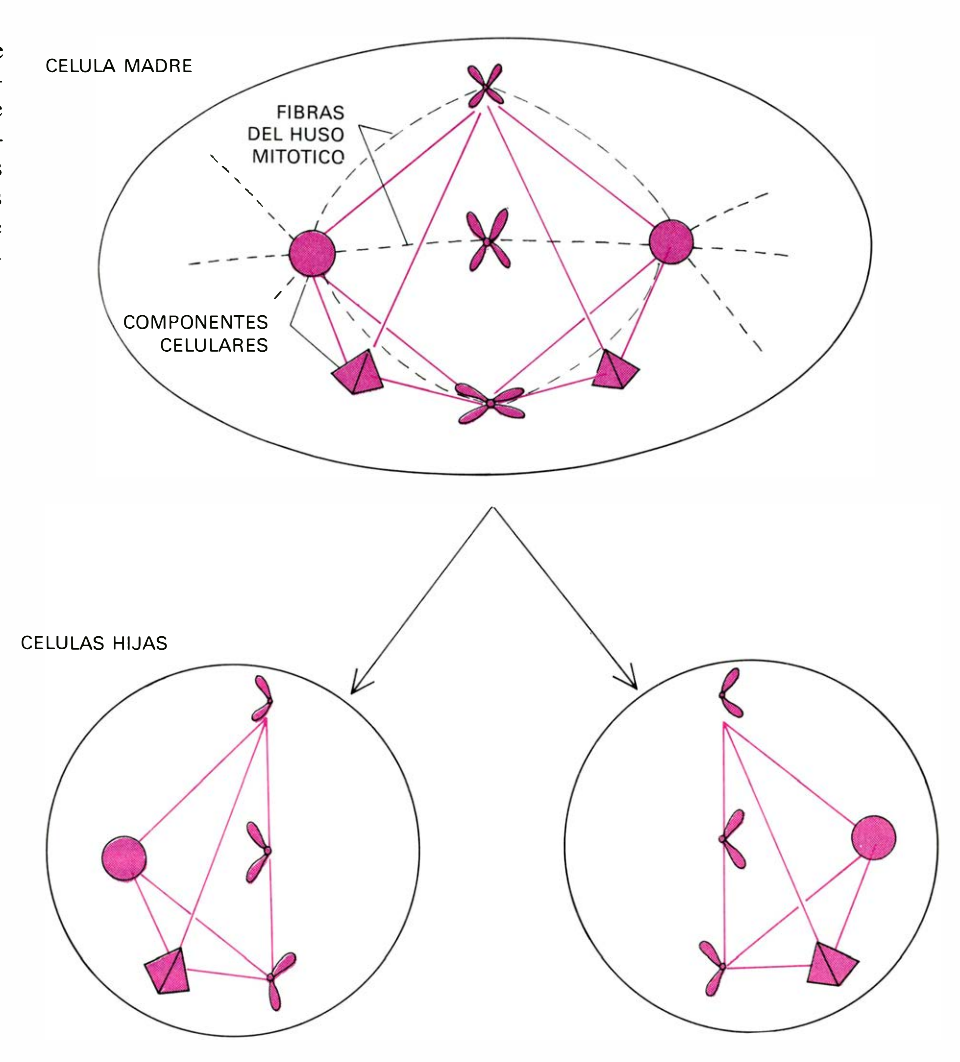
**APARECEN SEMEJANZAS SORPRENDENTES entre las dos ramas de las estelas fagocinéticas surgidas de la división de una célula madre en dos células hijas. En las dos micrografías superiores, las estelas de las dos células hijas y las cuatro nietas presentan simetría especular. En la micrografía inferior, las estelas son idénticas: están relacionadas por rotación más que por simetría.**

lares simuladas. Pero debido a que este tipo de simulaciones implica inevitablemente hacer toda una amplia serie de suposiciones, resultaría más satisfactorio enfocar el problema buscando más pruebas experimentales o explicaciones teóricas en torno al motivo por el que las dos células hijas se movieran siguiendo vías idénticas o especularmente simétricas.

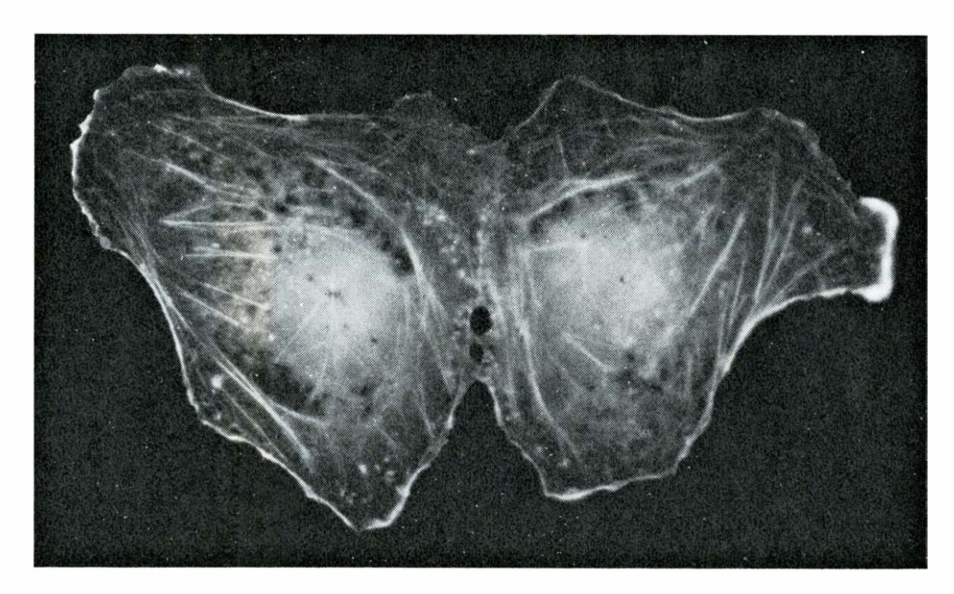
En la búsqueda de semejante explicación teórica habrá que estudiar con más detalle el proceso de la división celular o mitosis. Durante este proceso, los cromosomas del núcleo celular se duplican y quedan ordenados en el plano de división que pasa por la parte central de la célula. Más tarde, las mitades duplicadas de cada cromosoma se separan a lo largo de las fibras del huso mitótico, de tal modo que las dos células hijas formadas por la división reciben dotaciones cromosómicas iguales. Sin embargo, la separación cromosómica no es suficiente en sí para suministrar a las células hijas todo lo que necesitan para ser plenamente funcionales. Cada una de las células requiere además copias de los orgánulos celulares vitales y de otros componentes: éstos también han de duplicarse y distribuirse en los dos compartimientos de la célula madre destinados a convertirse en células hijas.

Aunque podemos suponer que los orgánulos celulares están repartidos de una forma igual en las dos células hijas, ello no implica que dichos componentes estén ordenados en ellas de un modo idéntico. Por el contrario, debido a que el huso mitótico es una estructura con una simetría especular casi perfecta, los pares de orgánulos duplicados podrían reunirse y separarse según el plano de división de la célula, del mismo modo que se dividen los cromosomas. Posteriormente a una distribución de este tipo de los componentes celulares, la organización intracelular tridimensional de una de las células hijas sería la imagen especular de la otra.

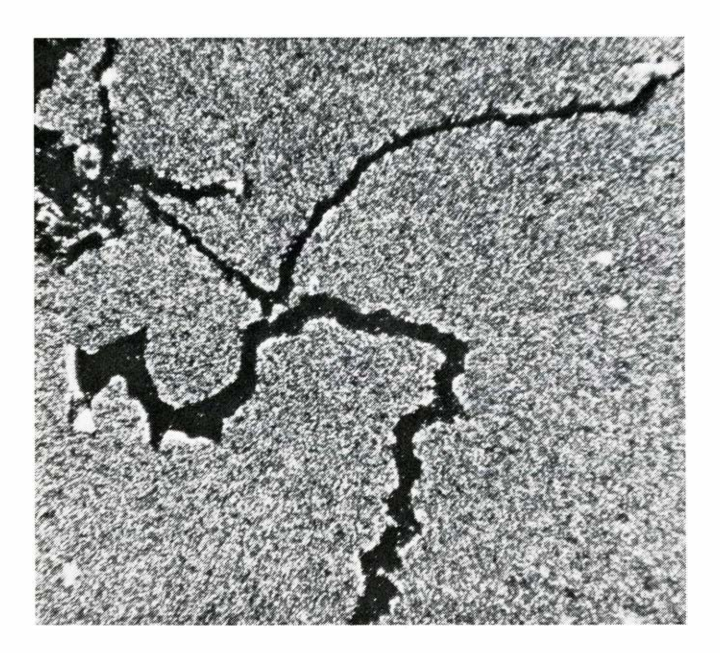
Para que, posteriormente a la división, las células hijas lleguen a ser idénticas, tal y como se suele suponer que son, sería necesaria una redistribución, de suma complejidad, de los componentes celulares, que resultaría una tarea análoga a la de transformar una mano derecha en una mano izquierda por reordenación de los huesos, los músculos, los vasos sanguíneos y las uñas. Si aplicamos la navaja de Occam, es decir, si analizamos la situación eliminando todas las explicaciones posibles (menos una, la más sencilla), a la vista de las pruebas disponibles podremos suponer que

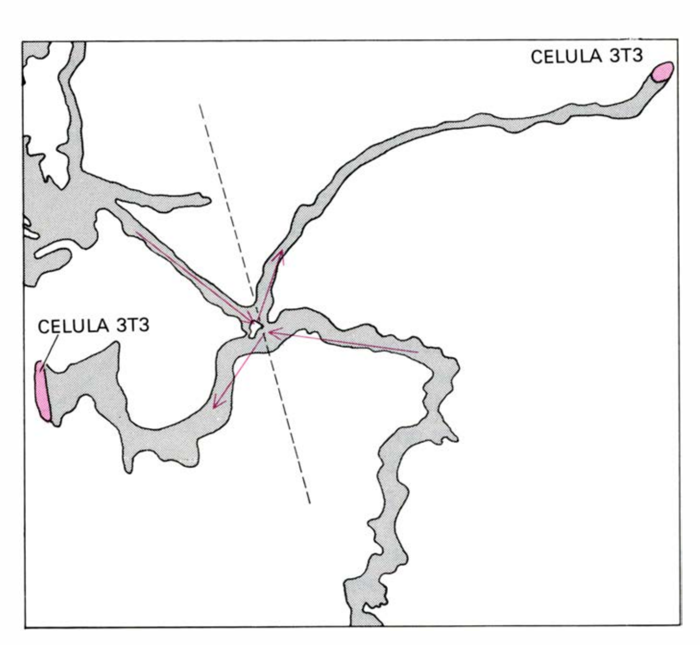



**ESTE MODELO DE DIVISION CELULAR ilustra esquemáticamente cómo la simetría especular del huso mitótico *(líneas discontinuas)* puede darnos una explicación de la tendencia de los pares de células hijas a migrar siguiendo vías simétricas, imágenes especulares una de otra. Según este modelo, los cromosomas y demás componentes celulares se duplicarían y quedarían distribuidos a los lados opuestos del huso durante la división celular, de tal modo que la organización de una célula hija sería especularmente simétrica a la otra. (La ilustración es propiedad de Alan D. Iselin.)**



**LAS FIBRAS QUE CONTIENEN ACTINA BRILLAN en el interior de dos células hijas hermanas, como consecuencia de su revelado por la técnica de la inmunofluorescencia indirecta. Aunque no se puede esperar que exista una simetría rigurosa entre ambas distribuciones de actina, puesto que cada célula se halla en su propia fase de movimiento, la simetría especular queda patente. Este hecho sugiere que la organización de las dos células hijas es, efectivamente, una organización de simetría especular. La micrografía, que está aumentada en 1400 diámetros, es propiedad del autor.**

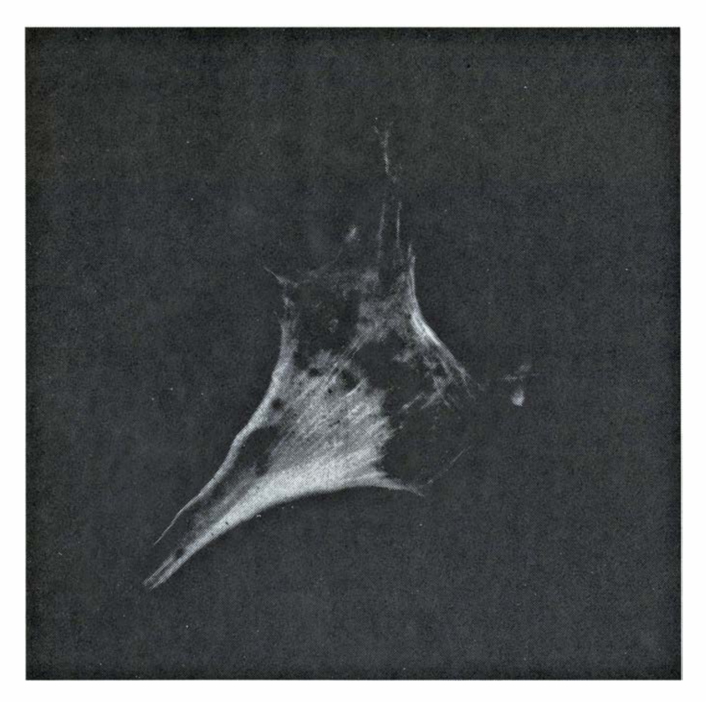


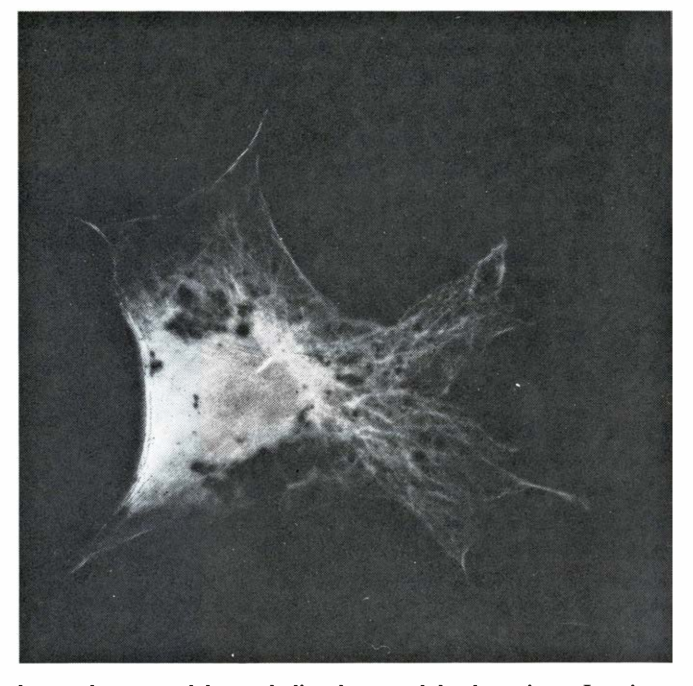



**ESTELAS de celulas que colisionan. Recuerdan curiosamente las colisiones elásticas de objetos sólidos como, por ejemplo, bolas de billar. En la micrografía de la izquierda se ven dos células 3T3 migrantes, aumentadas 94 veces, que entran en colisión en el centro del marco. Después de un contacto de dos horas, ambas células se reorientan y se apartan una de otra tal y como si rebotaran elásticamente. El mapa de la derecha muestra cómo cada una de las células conserva una de las componentes de su movimiento mientras invierte el sentido de la otra. Esta estrategia sería bastante lógica para una célula 3T3 que se halle migrando en el interior de un embrión. La razón de ello estriba en que así resultaría muy poco probable que la célula fuera devuelta a su punto de partida por múltiples colisiones con otras células embrionarias migrantes.**

las células hijas se ahorran todas estas complicaciones y quedan como mutuas imágenes especulares. Si esta suposición es correcta, parece lógico que la complementaridad estructural de las dos células hijas sea la causa de su migración en trayectorias especularmente simétricas. De hecho, este razonamiento puede resultar muy interesante si se extiende más allá del campo del movimiento celular y se especula que la misteriosa simetría bilateral de todos los animales y de la gran mayoría de las partes vegetales, como las hojas y los pétalos, pueden tener su origen en la simetría especular de determinadas células en división en los primeros estadios del desarrollo embrionario.

La aportación de pruebas en apoyo de la hipótesis de una organización en imagen especular de las células hijas surgió de la visualización de la distribución de las fibras que constituyen el esqueleto interno de las células. Dos años antes de que yo descubriera las estelas fagocinéticas de las células 3T3, Elias Lazarides y Klaus Weber, trabajando también en





**LAS ESTRUCTURAS CELULARES que participan en el control de la migración celular se pueden visualizar mediante la técnica de inmunofluorescencia indirecta. La micrografía de la izquierda muestra la distribución de las fibras que contienen actina (microfilamentos) en el interior de una célula que se halla en movimiento activo. La ordenación paralela de los microfilamentos extendiéndose hacia la parte caudal de la célula sigue la misma dirección que el movimiento que efectúa la célula en ese momento. Al parecer, estas fibras actúan de "raíles" por los que la masa celular se desliza durante el desplazamiento. La micrografía de la derecha muestra la distribución de los componentes celulares y fibras que están compuestos principalmente por la proteína tubulina. Las fibras en forma de "fideos" son microtúbulos. La vara de brillo intenso situada cerca del núcleo celular es el "cilio primario" que surge de una estructura cilíndrica denominada centriolo. Aunque se desconoce la función del cilio primario, su orientación (y, por tanto, la del propio centriolo) está correlacionada con la dirección del movimiento celular.**

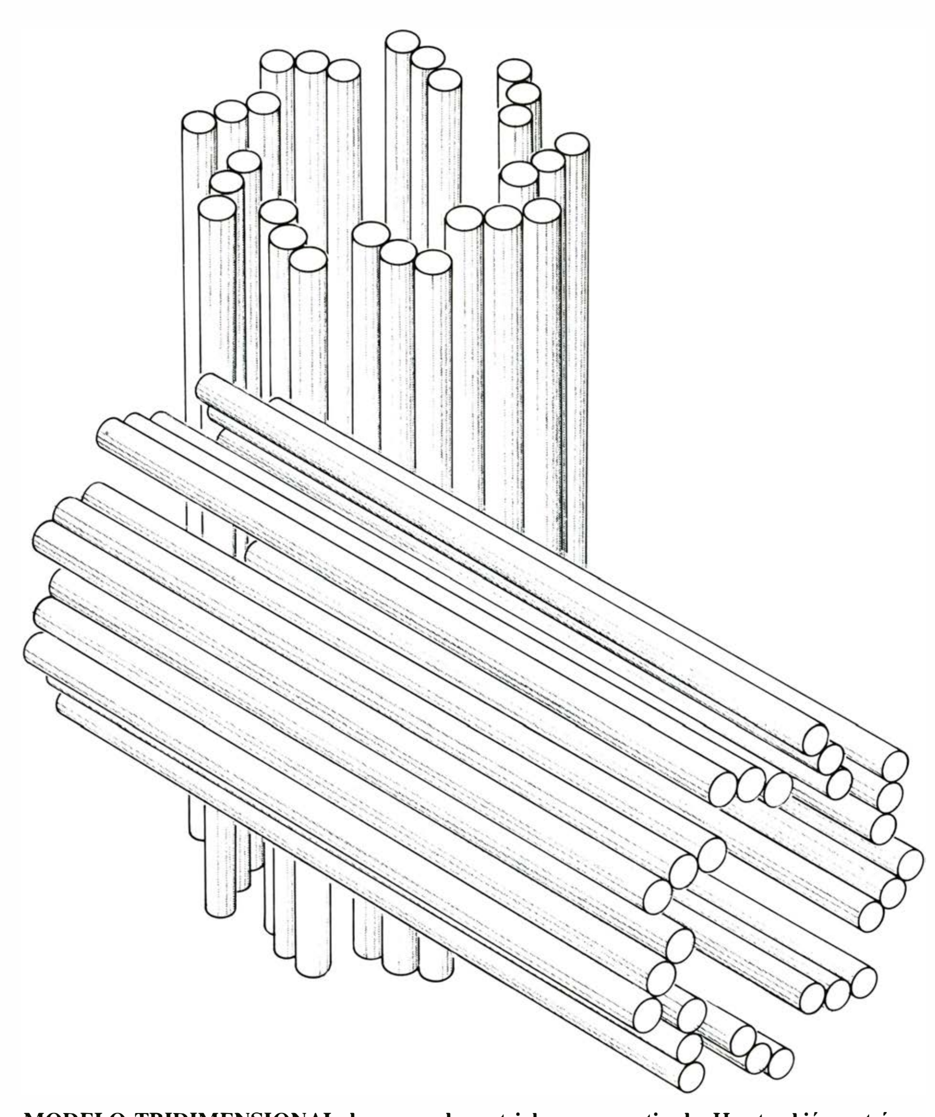
el laboratorio de Cold Spring Harbor, habían hallado un anticuerpo específico para la proteína, denominada actina, que constituye uno de los tipos de fibras estructurales intracelulares (los microfilamentos). Cuando se aplican estos anticuerpos a células fijadas en cuyas membranas se ha aumentado la permeabilidad para grandes moléculas, aquéllos penetran en el interior atravesando la membrana y cubren los microfilamentos. Posteriormente, se liga un marcador fluorescente a las fibras cubiertas del anticuerpo, por lo que dichas fibras brillan fuertemente si se observan con un microscopio de fluorescencia. Esta técnica se llama inmunofluorescencia indirecta y hoy en día la utilizan muchos investigadores para poner de relieve varios tipos de fibras subcelulares.



**DOS CENTRIOLOS,** situados en ángulo recto uno respecto del otro. El centriolo de la izquierda se muestra en sección transversal; el de la derecha está cortado longitudinalmente por su eje más largo. Los centriolos son estructuras cilíndricas formadas por la ordenación, de una geometría sorprendente, de nueve "paletas". Cada paleta consta de tres microtúbulos. Aumento: 70.000 veces.

Cuando yo apliqué la técnica de inmunofluorescencia indirecta al revelado de la forma distributiva de los microfilamentos en el interior de las células hijas, comprobé que, efectivamente, la ordenación de las fibras dentro de una de las células hijas era la imagen especular de la ordenación de las fibras en la otra. No era de esperar que hubiera una simetría rigurosa, ya que, en el momento de la fijación, las células hijas solían estar en fases de movimiento diferentes. No obstante, me volví a encontrar con casos en que la organización interna de los pares de células parecía, o bien no estar relacionada, o bien ser idéntica.

Quizá se puedan explicar los casos de identidad o de falta de relación de las estelas fagocinéticas y de las formas distributivas de los microfilamentos en los pares de células hijas por una simple analogía. Observe el lector la sombra de sus manos a la vez que mantiene una de ellas estática y gira la otra alrededor de su eje. Cada mano se presenta como una imagen especular, casi perfecta, de la otra, en cambio, las sombras pueden carecer de relación entre ellas cuando una mano se halla en determinadas posiciones rotacionales con respecto a la otra. Por otra parte, cuando una de las manos se gira 180 grados respecto de la otra, las sombras parecen idénticas. Se podrían aplicar argumentos similares a las estelas y a las distribuciones de los microfilamentos que no presentan simetría especular. Al igual que las sombras, las estelas y los mapas fluorescentes son proyecciones bidimensionales, sobre el plano de la migración, de la simetría especular tridimensional postulada para las células hijas. Si, inmediatamente después de la división celular, las dos células hijas, todavía esféricas, efectúan una rotación una respecto de la otra y sufren



**MODELO TRIDIMENSIONAL** de un par de centriolos, esquematizado. Hay también proteínas (no indicadas aquí) asociadas con las partes interna y externa de los cilindros. La capacidad de los centriolos para organizar los microtúbulos en el extremo frontal de una célula en movimiento hace pensar que desempeñan un papel esencial en la dirección de la migración celular; a pesar de los descubrimientos en ese terreno se sigue desconociendo el mecanismo exacto de dicha función.

el aplanamiento ulterior sobre el sustrato, los componentes subcelulares de una de las células hijas quedarán organizados respecto del plano de migración; y ello de modo que su relación en imagen especular respecto de la otra célula no quede puesta de manifiesto. En consecuencia, los mapas fagocinéticos de ambas células pueden resultar bastante diferentes. En el caso particular de que la rotación sea de 180 grados de una célula respecto de la otra, las estelas y mapas de microfilamentos de las células hijas serán idénticos.

El hecho de que unas células hijas, que ya están bastante alejadas una de otra, sigan realizando cambios direccionales de una manera estrechamente relacionada hace pensar que estos cambios estarían predeterminados de algún modo por la célula materna. Se puede volver a encontrar algunas características de una célula dada en sus cuatro células nietas. Y puesto que la superficie de una cápsula de cultivo, que contiene una solución nutritiva homogénea, no tiene por qué ser diferente de cualquier otra, no parece que las condiciones normales de cultivo constituyan una inducción externa que impulse la célula a desplazarse. Por tanto, el empeño de las células en migrar parece estar predeterminado por influencias intracelulares. Es posible que las células "recuerden" y lleven a cabo una parte de las instrucciones que hubieran sido apropiadas en el interior del embrión del cual fueron extirpadas en un principio. El hallazgo de estelas ramificadas simétricas o idénticas sugiere que la predeterminación del movimiento comprende hasta los cambios direccionales a realizar por la célula a lo largo de su desplazamiento.

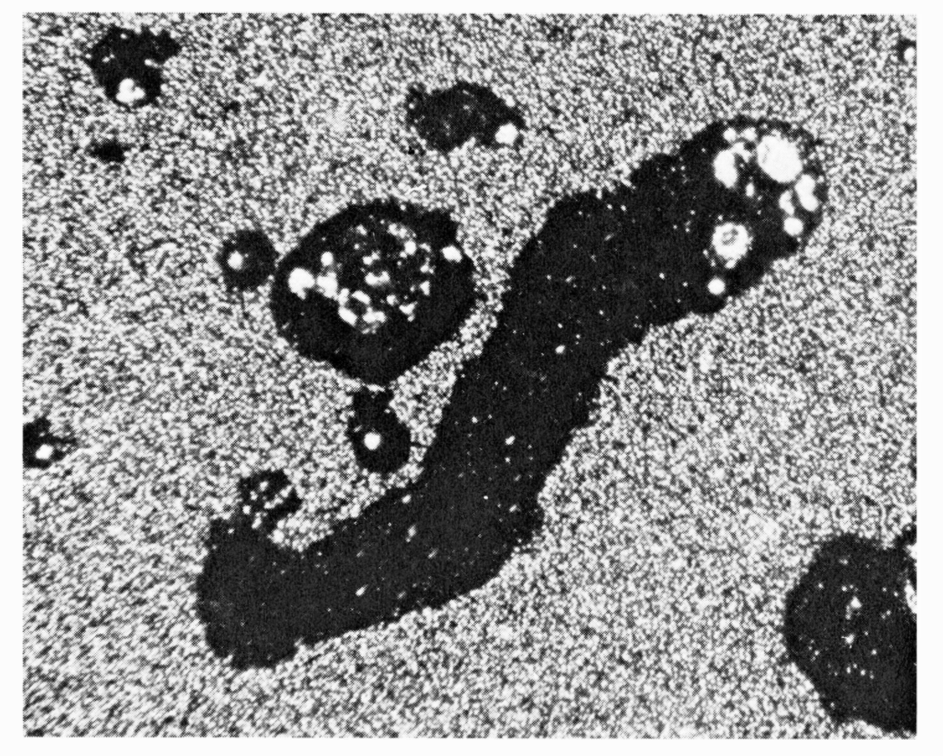
La colisión de dos células migrantes es otro acontecimiento que nos proporciona un ejemplo sorprendente del comportamiento ordenado que se registra en las células animales. Cuando una célula 3T3 entra en contacto con otra célula 3T3 o con una célula no migrante, el lamelipodio laminar que está en la parte frontal de la célula suspende su movimiento ondulatorio. La célula se va echando entonces lentamente hacia atrás, apartándose del área de colisión y dejando entre ella y la otra célula unas prolongaciones puntiagudas denominadas fibras de retracción, que forman un puente a través del espacio que separa ambas células. Finalmente, pasadas unas dos horas o más, nacen lamelipodios nuevos de otras regiones de la membrana celular y la célula sale en migración en una dirección diferente.

Las estelas fagocinéticas, que dejan las células animales que han colisionado, presentan un rasgo sorprendente. Cuando una célula 3T3 entra en colisión con otra célula, los lamelipodios nuevos no se forman simplemente en cualquier zona de la circunferencia celular; se originan en unos puntos específicos, de suerte que la célula huya de la zona del impacto, igual que si se tratara de un choque elástico en que el proyectil quede reflejado y se aleje de la diana. Concretamente, si la dirección de la migración celular se representa por un vector que tiene una componente tangencial y otra perpendicular (la del impacto), después de la colisión la componente tangencial del movimiento celular permanece inalterada, y la componente perpendicular permanece invertida.

Aunque resulta evidente que la interacción de dos células migrantes tiene poco en común con la física de dos bolas de billar que chocan, es lógica la estrategia que consiste en conservar al menos una de las componentes de la dirección celular después de la colisión, pues ello reduce las probabilidades de que una célula que migra en el interior de un embrión vuelva a su punto de partida después de sufrir múltiples colisiones con otras células. En resumen, parece ser que, a pesar de que los desplazamientos de las células 3T3 estén esencialmente predeterminados por influencias intracelulares, las señales extracelulares, como puede ser la colisión con otra célula, son capaces de variar las instrucciones de movimiento seguidas hasta entonces por la célula.

La capacidad de las células migrantes para predeterminar sus movimientos y reorientar su migración después de una colisión implica la existencia de unos componentes celulares especializados, capaces de almacenar y revisar programas de movimiento y de controlar la ejecución de las instrucciones en el momento adecuado por el aparato motor de la célula. Inicié la búsqueda de estas componentes intentando visualizar las estructuras celulares que estuvieran orientadas de un modo especial con respecto a las estelas fagocinéticas. Mediante la técnica de inmunofluorescencia indirecta, me encontré con que realmente había en el interior de la célula unas estructuras que respondían de ese comportamiento.

En las células 3T3 migrantes se ven "manojos" o conjuntos de microfilamentos orientados paralelamente a la dirección del movimiento celular. En la mayoría de los casos, los microfilamentos van desde la parte inferior del núcleo hasta la parte posterior de la célula, donde a menudo convergen en la "cola" alargada, típica de los fibroblastos migrantes. Los haces de microfilamentos



**UN GRUPO DE CELULAS EN MIGRACION procedentes de la línea celular llamada PtK1 fue lo que formó esta estela fagocinética durante un período de cuatro días. Un grupo cercano al anterior no migró y un gran número de células individuales** *(que se visualizan como puntitos blancos en el interior de anillos negros)* **tan sólo se desplazaron una corta distancia. Cómo estas células, que aisladamente apenas se mueven, pueden asociarse e iniciar un movimiento de un modo aparentemente tan coordinado es una cuestión que queda aún por resolver. Sin embargo, estas interacciones son primordiales en el desarrollo embrionario, el cual depende de la migración de grupos de células.**

se localizan principalmente en la proximidad del sustrato y, según parece, se les aprovecha como "raíles" por los que la masa celular se desliza durante su desplazamiento. De acuerdo con este modelo, las porciones de raíles que son utilizadas convergen en la zona caudal y se desmantelan al retraerse la cola al interior de la célula por un mecanismo similar al de la contracción muscular. Al parecer, este deslizamiento por los raíles permite que el núcleo y el citoplasma se muevan en paralelo, reduciéndose así el peligro de que quede enredada la delicada organización intracelular. Este movimiento paralelo queda ilustrado por el hecho de que, a menudo, el núcleo de una célula migrante permanece en su orientación inicial aunque la célula haya girado varias veces su extremo frontal.

La búsqueda de un componente celular que estuviera implicado en la dirección del movimiento de las células migrantes me llevó a investigar sobre los centriolos, unos corpúsculos cilíndricos hacia los que convergen las fibras del huso mitótico durante la división celular. Los centriolos están formados por una ordenación, de una geometría increíble, de nueve tripletes compuestos por unas pequeñas estructuras tubulares denominadas microtúbulos. Los centriolos suelen hallarse formando pares, con un centriolo orientado en ángulo recto respecto del otro. Cada una de las células hijas recibe un par de centriolos en la división celular y posteriormente fabrica el otro a partir del heredado.

Además de hacer de polos del huso mitótico, los centriolos también desempeñan otras funciones, y se encuentran en varias estructuras celulares como pueden ser los cilios y los flagelos. Muchas células animales cultivadas también forman lo que se llama un cilio "primario", o interno, que surge por alargamiento de uno de los dos centriolos en el interior del cuerpo celular. Una vez formada, la vara del cilio primario queda englobada en una vacuola, o una especie de saco membranoso, y queda almacenada cerca del núcleo celular. Hace mucho tiempo que la función biológica de este cilio resulta un misterio.

También apliqué el método de inmunofluorescencia indirecta para visualizar el cilio primario en el interior de las células migrantes, pero esta vez el anticuerpo utilizado era específico para la tubulina, principal proteína estructural de los cilios, flagelos, centriolos y microtúbulos. En prácticamente todos los casos, el cilio primario de las células 3T3 migrantes apuntaba en la misma dirección que el movimiento de la célula en aquel momento. Esta relación hizo surgir todo tipo de conjeturas, desde la posibilidad de que la vara del cilio quedara pasivamente orientada por las corrientes citoplasmáticas que se generan durante el desplazamiento celular hasta la posibilidad de que el cilio primario, o al menos su base, es decir el centriolo, desempeñara un papel directo en orientar la dirección de la célula migrante.



**VISTO DE CERCA, así aparecen un grupo de células PtK1 que migran colectivamente. En esta micrografía, aumentada unas 820 veces, se aprecian las partículas de oro que cubren el sustrato.**

Esta última especulación estaba respaldada por los trabajos de otros investigadores que habían encontrado que los centriolos de las células animales podían actuar como centros de organización de los microtúbulos. A su vez, los microtúbulos determinan la polaridad de las células, es decir, determinan cuál de los extremos es el frontal y cuál es la parte caudal. Además, hay unas cuantas pruebas adicionales de que los centriolos tienen como función guiar la migración: las células vegetales, que son incapaces de migrar, carecen de centriolos.

Aún no se conoce el mecanismo exacto por el que se programa la migración en las células animales, pero se pueden hacer algunas observaciones generales acerca de dicho programa. En primer lugar, la ejecución sucesiva de las instrucciones cronometradas del programa requiere la existencia de un "reloj" interno. Hace mucho tiempo que se sospecha la presencia de este tipo de relojes en las células, puesto que presentan un ciclo temporal de gran exactitud. En segundo lugar, es muy probable que el programa esté representado por una estructura física que pueda existir en dos formas, imágenes especulares mutuas, ya que ello explicaría las trayectorias de simetría especular de las células hijas hermanas. En tercer lugar, seguramente la estructura del programa está asociada, en alguna manera, con los centriolos.

Una de las propiedades más destacables de las células animales es su capacidad para cooperar entre sí formando organismos multicelulares. Precisamente, hace poco se han observado algunos tipos de células animales cultivadas que coordinan sus migraciones. Yo mismo he podido ver cómo pequeños grupos de las células denominadas PtK1 migraban conjuntamente en un cultivo; otras líneas aisladas por Green forman láminas de células que pueden deformarse y fluir unas respecto de otras. Hoy en día, el establecimiento de estas líneas celulares ha permitido el estudio de la migración colectiva de poblaciones de células en cultivos de tejidos.

En conjunto, las nuevas perspectivas de la migración de células animales que nos proporciona el análisis fagocinético tienen base suficiente para hacernos pensar que los movimientos de estas células están primordialmente predeterminados por una estructura hipotética programada en el interior de cada célula. Contrariamente a los puntos de vista que prevalecían en cuanto a la migración celular se refiere, la fagocinética ha revelado que hay geometría donde se pensaba que había caos, y existen señales de determinismo donde muchos esperaban ciegos hechos aleatorios.

# Los insectos de la superficie del agua

*La fuerza de atracción entre las moléculas de agua forma una película elástica en la superficie de una zona de agua tranquila. En este ambiente, de cualquier región del mundo, habitan los mismos cuatro tipos de insectos*

Lorus J. Milne y Margery Milne

La superficie de un estanque, un remanso de un río o incluso un charco constituye un medio ambiente muy especial. Dondequiera que se encuentren aire y agua en calma, se observa una película superficial que separa el mundo seco de arriba del mundo húmedo de abajo. Aunque muchas especies de insectos permanecen durante parte al menos de su vida en el agua, sólo unas pocas especies de ellos frecuentan el dominio de la superficie, en busca de alimento y solidaridad a lo largo de la frágil interfase. Estos insectos se hallan adaptados de un modo extraordinario a la explotación de la superficie del agua.

Las propiedades específicas de esta delicada película superficial derivan de las fuerzas de atracción entre las distintas moléculas de agua. En una masa de agua, las moléculas del interior sufren una atracción igual desde todas las direcciones. No ocurre así con las moléculas de la superficie, en donde la fuerza de atracción que se ejerce es desigual: son atraídas hacia el centro de la masa de agua. Como resultado final sucede que la superficie actúa como si se tratase de una membrana elástica tensa, que soporta objetos de densidad superior a la del agua y que permite a determinados insectos permanecer y moverse sobre la misma.

Repartidos por todo el mundo, se encuentran los mismos cuatro tipos de insectos asociados a la superficie de aguas dulces. Hay zapateros, coleopteros, girínidos, otros hemípteros heterópteros *(Notonecta)* y colémbolos. Cada uno de estos grupos mantiene una relación diferente con la película superficial y con el agua y el aire que dicha membrana separa.

Los zapateros ocupan la parte superior de la película superficial. Son verdaderas "chinches de campo", es decir, insectos miembros del orden de los heterópteros. Los zapateros son conocidos por su habilidad en deslizarse y correr por encima de la superficie del agua gracias a su par de patas intermedias; se les llama también patinadores, tejedores o *wasserläufer* (corredores acuáticos). Existen varios géneros de zapateros. dos de los cuales se encuentran en todo el mundo: *Gerris,* que vive en la superficie de aguas dulces y *Halobates* que habita en la de aguas marinas.

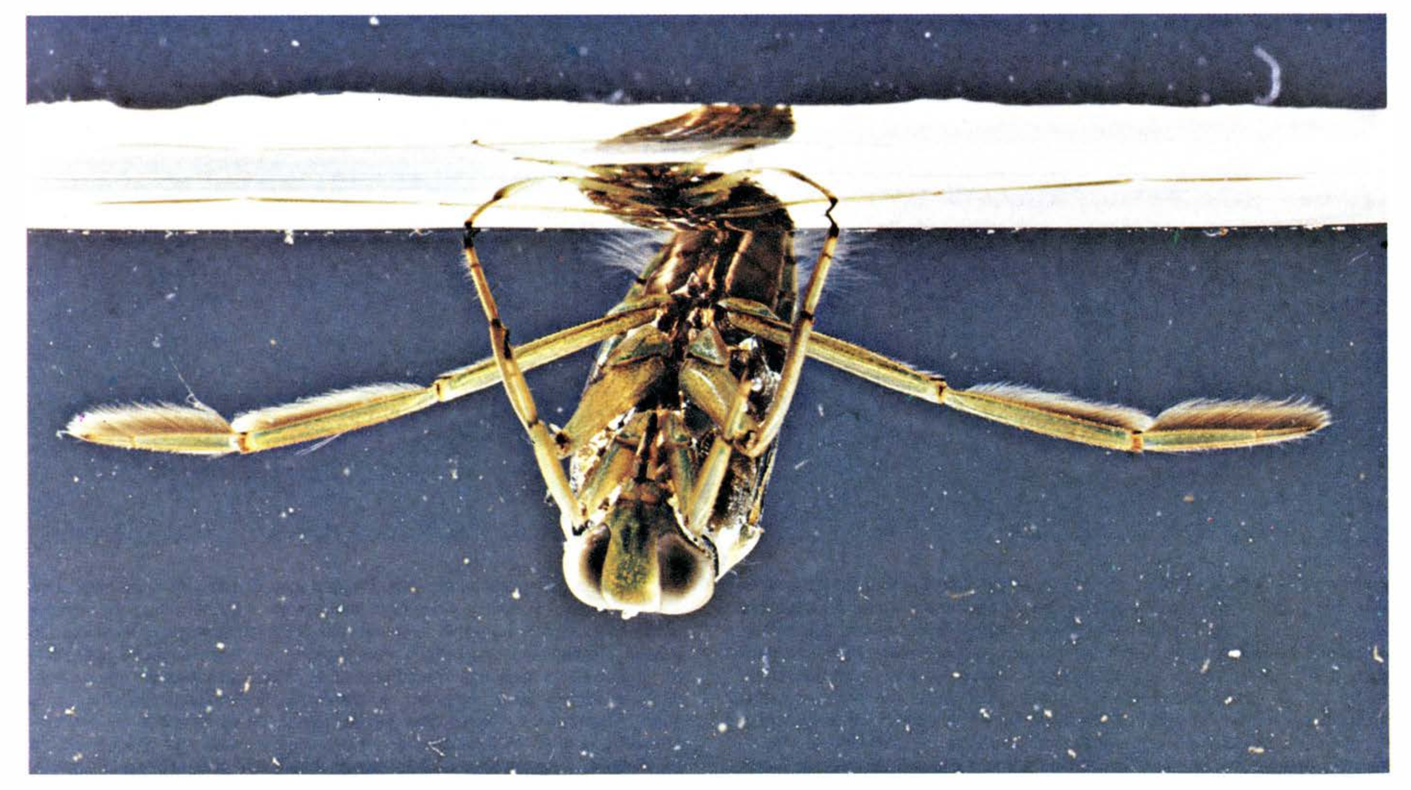
La mayoría de los zapateros superan en poco los cinco milímetros de longitud. Sus cuerpos negros están ligeramente deprimidos y afilados tanto por su región frontal como por su región caudal. Cuando el zapatero permanece en la película superficial se mantiene gracias a sus largas y delgadas patas intermedias y posteriores. El par de patas delanteras, más cortas, casi escondidas debajo de la cabeza, puede emerger de la película para apresar a otros insectos. Mientras el zapatero patina sobre la superficie, mantiene extendidas sus patas posteriores y, juntas, las delanteras, disposición que le permite sostenerse en dicho medio.

Las partes del zapatero que entran en contacto con la película superficial no llegan a mojarse. Se dice que una substancia es "mojable" cuando las moléculas de agua se adhieren a ella, esto es, si las moléculas se sienten más atraídas por esa substancia que por las otras moléculas de agua. La película superficial, creada por la fuerza de atracción entre las moléculas de agua, se destruye cuando una substancia "mojable" entra en contacto con ella. Normalmente, sólo están en contacto con el agua los pies del zapatero y la región de las patas posteriores que va desde la rodilla al pie. Estas zonas se hallan protegidas por recios cepillos de pelos que repelen el agua (hidrófugos). El resto del cuerpo está recubierto por escamas asimismo hidrófugas. El par de uñas afiladas que caracterizan el pie del insecto están situadas adecuadamente, por detrás del extremo de la pata y lejos de la película de tensión superficial a la que podrían perforar.

Parece claro que los zapateros pueden distinguirse entre una superficie de agua apropiada y otra que no lo sea. La caída de las primeras gotas de lluvia determina que se desplacen precipitadamente hacia la orilla; abandonan también el agua cuando se acercan los fríos invernales y las heladas. En tierra firme, los zapateros suelen ocultarse debajo de las hojas caídas hasta que el agua vuelve a adquirir la calma que les es propicia. La lluvia y el hielo, al destrozar la película superficial, arruinan el medio en donde el zapatero detecta y se procura el alimento y se relaciona con otros individuos de su especie.

El zapatero se informa de la situación del medio ambiente gracias a los rizos u ondas de la película superficial. Rodney K. Murphey, de la Universidad estatal de Nueva York en Albany, descubrió que el zapatero se entera de las perturbaciones de su entorno a través de sensores ubicados en sus cuatro largas patas. Estudiando al zapatero grande *Gerris remigis,* observó que el insecto se rige por los sensores de vibración localizados en la membrana flexible que se encuentra entre los segmentos de los pies. La secuencia en que estos sensores detectan las vibraciones producidas indica al insecto cuánto debe moverse para hacer frente a un posible peligro o aprovecharse de una presa en potencia. El zapa-

EL ZAPATERO permanece quieto o zigzaguea sobre la elástica película superficial que se ha formado por la fuerza de atracción entre las moléculas de agua. Los tarsos del zapatero, o pies, y las patas posteriores (a partir de las rodillas), que son las regiones en contacto con la superficie del agua, están recubiertos de pelos hidrófugos; por repeler el agua, no llega a destruir la película superficial. Se diría que están apoyados sobre burbujas, pero tales burbujas son las depresiones creadas en la película superficial por las patas posteriores y los tarsos intermedios.

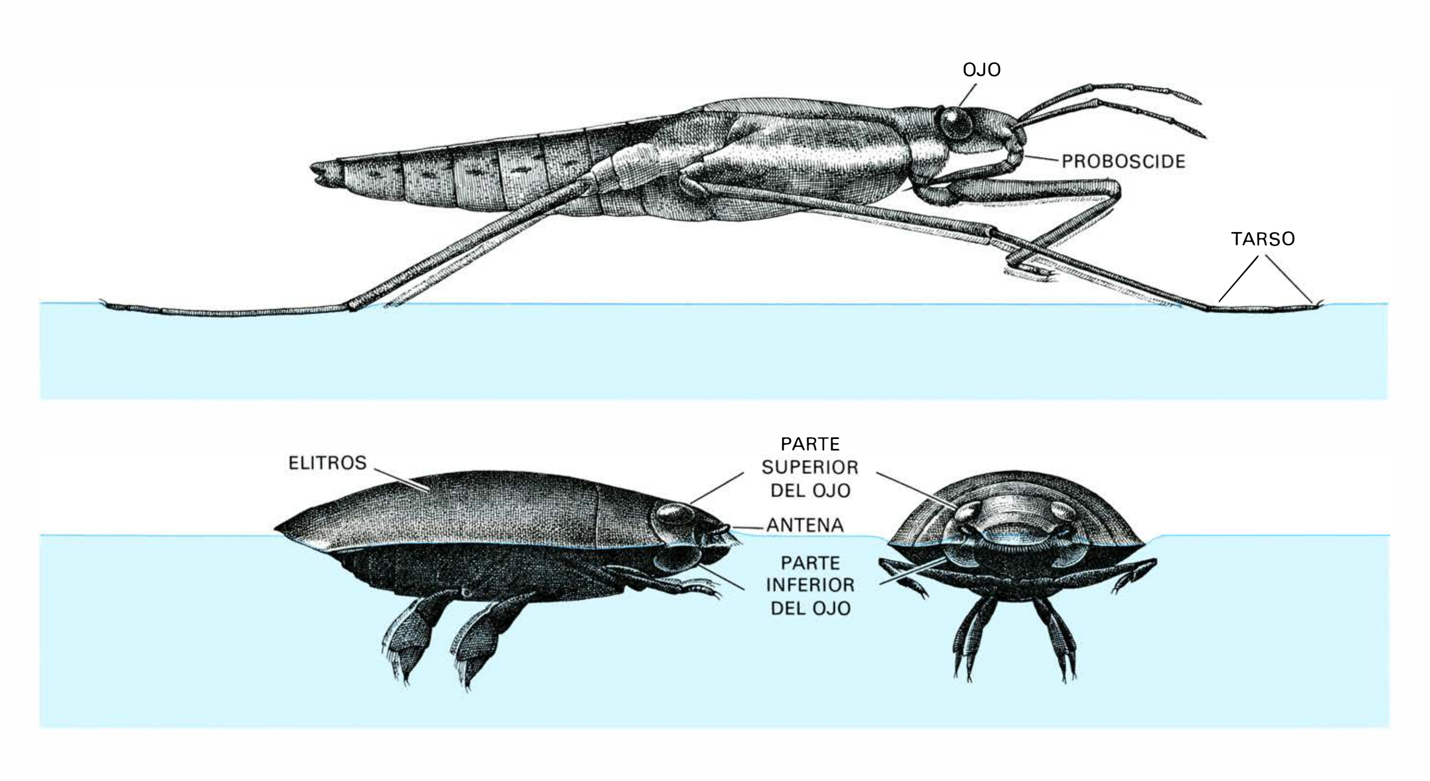


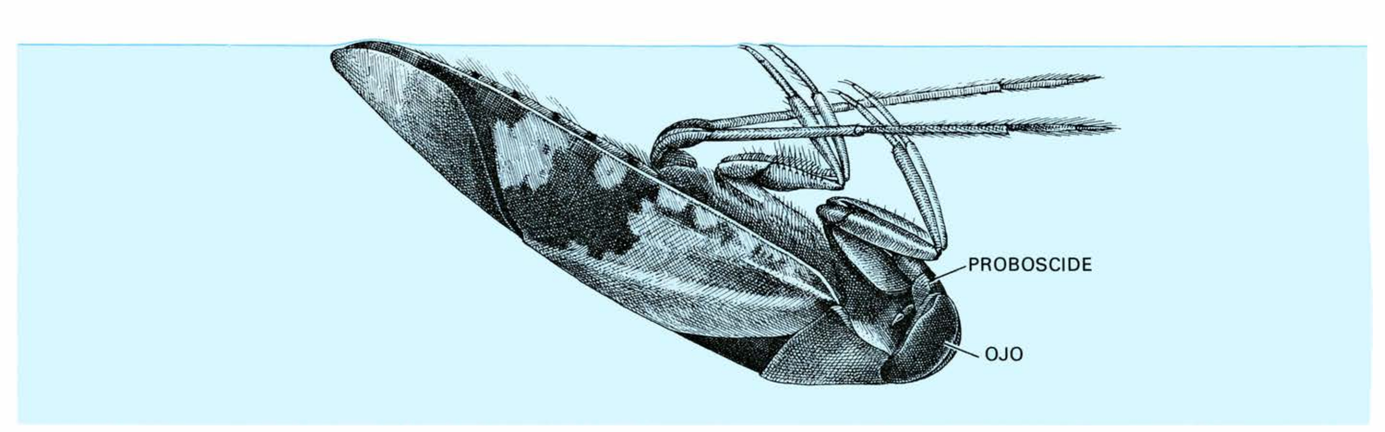
*NOTONECTA* habita en el agua por debajo de la película superficial. Queda con el vientre hacia arriba porque dispone de un depósito de reserva de aire, que almacena en su cara ventral. El insecto avanza propulsando por las patas posteriores, que actúan de remos. El ejemplar de la presente fotografía distiende los extremos sensitivos de sus patas intermedias contra la película superficial del agua. *Notonecta* obtiene la información necesaria de las finas ondas o vibraciones que se transmiten por la superficie. El extremo abdominal queda reflejado en dicha membrana superficial.

tero gira y se dirige hacia el lugar del suceso moviendo sus patas remeras en sentidos opuestos, una hacia adelante y otra hacia atrás, como si fuera un remero que moviera las palas convenientemente para cambiar la dirección del bote. La pata posterior del lado hacia el cual el insecto gira actúa de pivote, nadando hacia adelante con la rapidez que induce el empuje de la otra pata posterior, mientras que las patas anteriores sirven de sostén del cuerpo.

El zapatero utiliza los ojos, al igual que los sensores de vibraciones, para calibrar la naturaleza de otras situaciones. Distintos estudios sobre pequeños zapateros de Alemania Occidental han demostrado que los insectos pueden ver un objeto, del tamaño de una cara humana, a unos 3 metros de distancia si el objeto en cuestión aparece contrastado sobre el fondo. Lanna Cheng, de la Scripps Institution of Oceanography, refiere que cuando los oceanógrafos arrastran redes o mangas detrás del barco en noches cerradas recogen más zapateros que durante el día o cuando la luna brilla intensamente. Esto aporta la prueba estadística que permite afirmar que, cuando hay suficiente luz, el zapatero distingue la red que se aproxima y huye.

Algún tipo de combinación de las informaciones visuales y las vibraciones posibilita al zapatero concluir si debe acercarse a una perturbación que ocurra

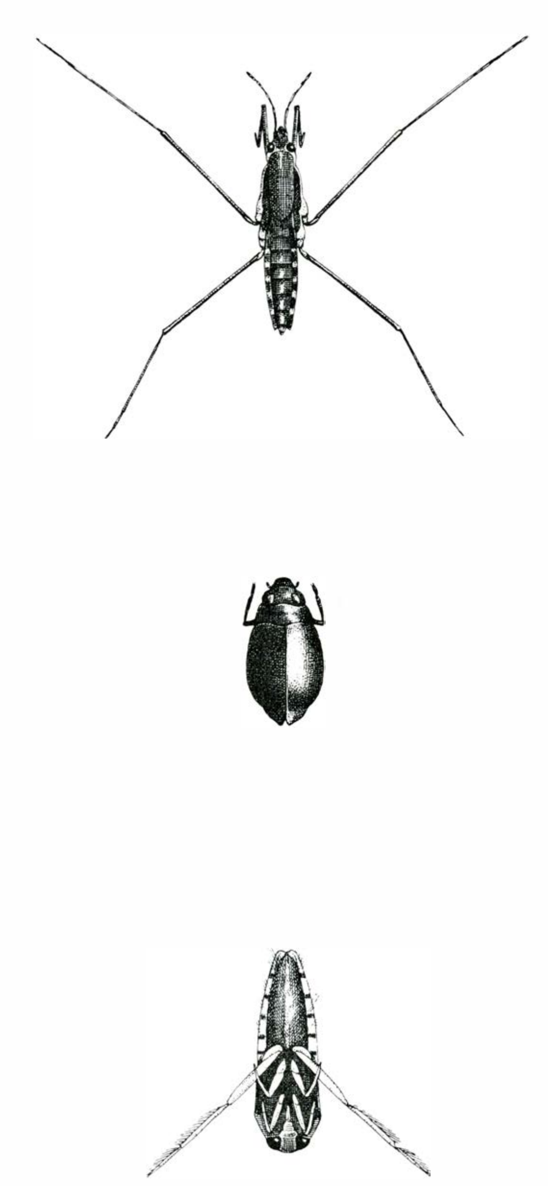



**TAMAÑOS RELATIVOS de tres tipos de insectos con las diferentes posiciones que ocupa con respecto a la superficie del agua. El zapatero *(arriba)* permanece, en toda su longitud, encima de la película superficial sobre sus largas y finas patas intermedias y posteriores o bien zigzaguea deslizándose sobre esa membrana impulsado por sus patas intermedias. Las patas anteriores, más cortas, pueden mantenerse juntas sobre la superficie del agua al objeto de ofrecerle soporte al desplazarse o pueden despegarse para manipular el alimento. Se alimenta de insectos más pequeños que encuentra en la película superficial o en sus inmediaciones; atravesando a sus presas con la afilada probóscide, el zapatero inyecta a la víctima una saliva anestésica y digestiva, y así, en cuestión de minutos, el contenido nutritivo del cuerpo atrapado se licua para ser succionado. Los girinos o coleópteros acuáticos *(en el medio)* viven semisumergidos en el agua. Pueden arrastrarse sobre una superficie sólida, bucear y volar, pero casi siempre se localizan surcando la película superficial, bogando con sus patas intermedias y posteriores. Al mismo tiempo que zigzaguea con rapidez, el insecto emite una serie de ondas en la película superficial. Las cortas antenas de que va provisto le sirven para detectar, a través de las ondas reflejadas, cualquier obstáculo u objeto que se encuentre en su camino. El insecto, alertado, cambia la dirección de su curso para evitar una rama que flota en el agua, encaminarse a depredar un artrópodo atrapado en la superficie o efectuar cualquier otra actividad. El girino se informa también con sus ojos compuestos, que están divididos en dos partes: la parte inferior del ojo registra lo que ocurre debajo de la superficie, mientras que la parte superior se ocupa de lo que ocurre por encima de la misma.**

en su contorno o si debe alejarse. Si el zapatero decide acercarse, gira y se dirige directamente hacia lo que está ocurriendo, efectuando pausas de alrededor de un quinto de segundo después de cada movimiento apendicular. Durante esta corta pausa, el zapatero puede, si es necesario, detectar otras vibraciones y corregir su curso.

Recientemente hemos observado un ejemplo de la velocidad y sensibilidad de *Gerris remigis,* en el curso de un pequeño drama en un estanque próximo a Nueva Inglaterra. Un gavilán que estaba realizando un vuelo rasante por encima de un campo de hierba, al lado del estanque, importunó a las hormigas guardianes de un nido subterráneo. Sabíamos que el nido estaba allí y comprendimos la razón por la que el ave empezó súbitamente a rascarse en distintas partes; las hormigas lo estaban mordiendo y atormentando. El ave se alejó volando un corto trecho, se sacudió vigorosamente y luego voló hacia arriba, por encima del estanque. Una hormiga que se había quedado demasiado tiempo adherida cayó al agua a poca distancia de la orilla. No podía nadar y empezó a agitarse en el agua produciendo vibraciones en la película superficial, alertando rápidamente a dos zapateros que se encontraban a unos 14 centímetros. Estos se dieron rápidamente la vuelta y bogaron hacia la hormiga con toda rapidez. El zapatero que había llegado primero lanzó el aparato bucal chupador directamente hacia la hormiga y se marchó llevándose la presa atravesada. Las piezas bucales del zapatero inyectaron saliva anestésica y digestiva en el interior del cuerpo de la hormiga. En menos de tres minutos, el contenido nutritivo de la hormiga se había licuado permitiendo así su succión por parte del zapatero. Este arrojó el pellejo vacío de la hormiga y se marchó zigzagueando por la película superficial.



Cuando *Notonecta (abajo)* descansa contra la cara inferior de la película superficial, el aire que llevan en sus largas muescas abdominales empuja hacia arriba, contra la superficie, y se forman unos abombamientos en la zona de la membrana superficial que entra en contacto con sus patas y su extremo abdominal. *Notonecta* puede moverse por la superficie, hundiéndose hacia el fondo o bien nadando; *Notonecta* es un fiero depredador, que atraviesa sus presas desde abajo con su punzante pico y chupa sus jugos. A la derecha, visión de los tres tipos de insecto por un observador del estanque.

Si la presa hubiese sido mayor, la hubiesen podido compartir ambos zapateros. No es ninguna rareza que varios zapateros se repartan un insecto notable, verbigracia, una libélula grande. La aunada combinación de la inyección de saliva de varios zapateros les capacita probablemente para domeñar grandes presas. A pesar de ello, los zapateros suelen alimentarse independientemente con insectos más pequeños. No obstante este carácter individualista en ese aspecto, se les encuentra frecuentemente patinando unos junto a otros en grandes grupos. A veces, hacia el mediodía, se reúnen centenares de ellos a la sombra que da un gran árbol a su charco o estanque. Si un zapatero choca contra otro, o se le superpone, lo normal es que ambos se separen inmediatamente. Estos encuentros probablemente se deben a errores, resultantes quizá de equivocaciones en la interpretación de las vibraciones de la película superficial.

Los zapateros que forman parte de estas manadas se nos presentan como moviéndose sin rumbo fijo por la película superficial. Pero, en realidad, sus movimientos están claramente dirigidos a una finalidad concreta, aunque este objetivo se mantenga oculto, con frecuencia, para un observador que se encuentre por encima de la superficie del agua. Cuando algún insecto pequeño de los que viven debajo de la superficie sube hacia ésta para tomar aire, el zapatero puede atravesar la película superficial, pinchar al insecto, succionarlo seco y tirarlo a un lado sin necesidad de exponerlo a la vista.

La película superficial se usa también como medio de comunicación. Los zapateros producen sus propias vibraciones en la película superficial siguiendo pautas que condicionan el comportamiento de los demás zapateros. Poseemos fotografías de grupos de zapateros en cursos de agua de Nueva Inglaterra en las que se advierte, con frecuencia, a un individuo en el centro de circunferencias concéntricas de vibraciones u ondas: esto significa que se acaba de mandar un enérgico mensaje. R. Stimson Wilcox, de la Universidad de Purdue, ha podido interpretar señales de este tipo. Trabajando en su laboratorio con zapateros australianos del género *Rhagadotarsus,* Wilcox encontró que los zapateros mostraban reacciones específicas para distintas señales que él mismo había provocado con un aparato flotador que se podía hundir en el agua gracias a un mando eléctrico, en el mismo acuario donde estaban los zapateros. Los insectos respondían, incluso manteniéndolos en una total obscuridad, a las señales propias del cortejo amoroso, amenazaban a otro zapatero y manifestaban otras diversas reacciones.

Una de las funciones principales de este tipo de comunicación reside en las diferentes fases del cortejo y del apareamiento. Wilcox observó que el zapatero macho informa a la hembra de su deseo sexual cuando ha encontrado un lugar adecuado para que se realice la cópula. Este lugar es un objeto fijo o flotante en el agua, verbigracia: una planta acuática o un trozo de madera que flota en la superficie. El macho agarra este objeto con sus patas delanteras o permanece cerca de él y empieza a sacudir la película superficial moviendo las patas remeras de arriba abajo. Cada llamada empieza con una alta frecuencia (23 a 29 ondas por segundo), se estabiliza a una frecuencia más baja (18 a 20 ondas por segundo) y finaliza con una o dos vibraciones de baja frecuencia (10 a 17 ondas por segundo).

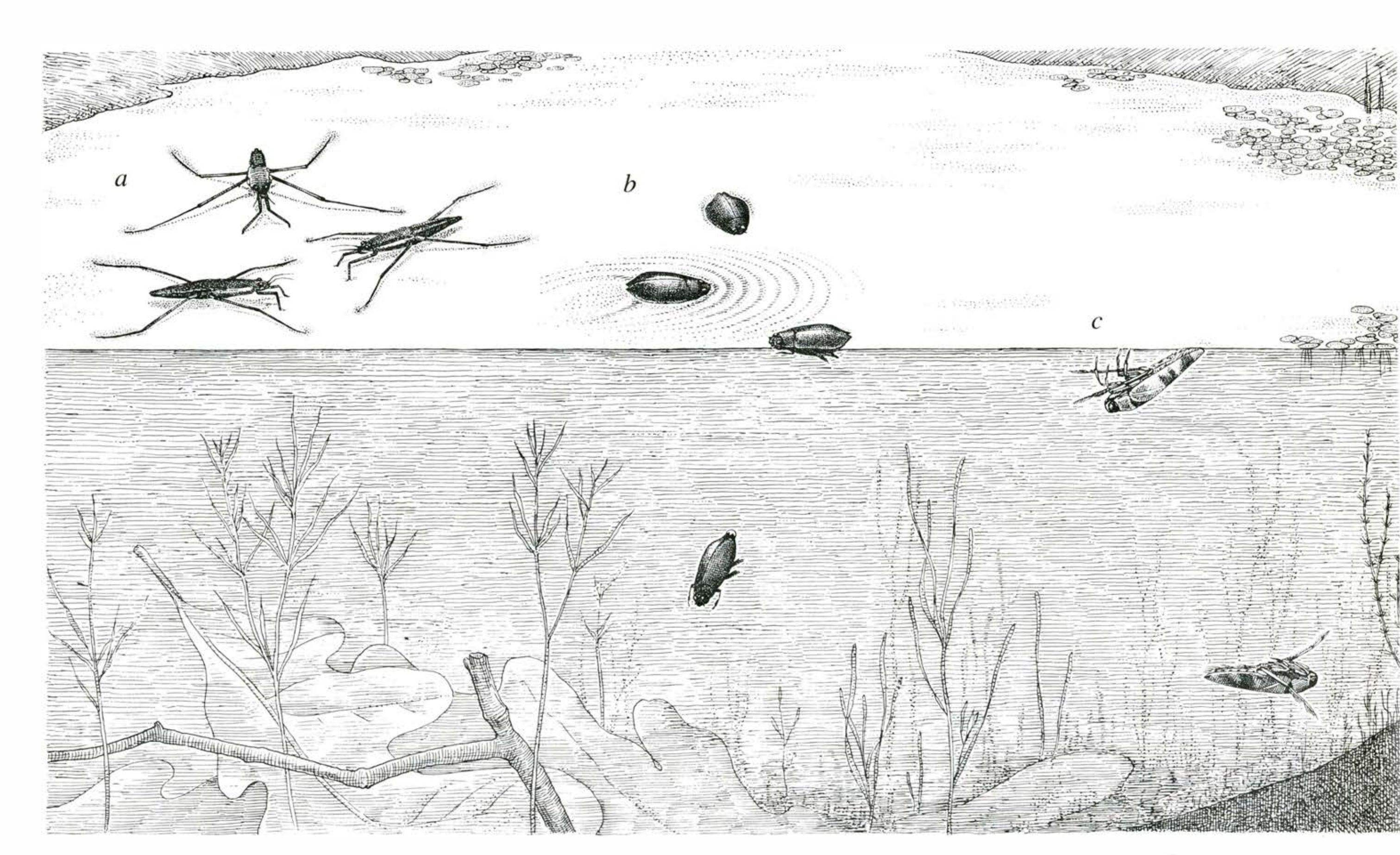
El macho efectúa de siete a 15 vibraciones. Wilcox no pudo descubrir ningún tipo de variabilidad individual en la realización de estas llamadas nupciales; las vibraciones realizadas por un solo macho varían entre sí tanto como las efectuadas por machos distintos.

La hembra que se encuentre dentro del radio de acción de esas ondas puede responder o no a ellas. Si lo hace, rema hacia el macho, haciéndole señales, a intervalos, de su aproximación. Las señales emitidas por la hembra son vibraciones de frecuencia menor, originadas por movimientos verticales de las patas delanteras; la frecuencia de estas señales suele registrarse entre 22 y 25 ondas por segundo. En cuanto el macho percibe el acercamiento de la hembra, le emite vibraciones del mismo tipo. La hembra le indica su complacencia para el apareamiento ya sea cruzando una de sus largas patas sobre otra del macho o bien asiéndole una de las patas posteriores o intermedias con sus patas delanteras y practicando un tirón seco.

El macho suelta el objeto que ha estado aguantando; la hembra se adelanta para asirlo como soporte con sus patas delanteras. El macho la cubre y copulan durante un minuto, más o menos. El macho se retrae luego y, mientras está aún de cara a la hembra, produce signos de postapareamiento, indistinguibles de las señales propias del cortejo. En ese momento, la hembra acostumbra a dejar el soporte para volverlo a asir después con las patas posteriores y excavar un agujero en donde depositará los huevos. Según parece, las hembras de los zapateros sólo ponen los huevos en los objetos que les han servido de soporte durante la cópula. Los únicos objetos conocidos sobre los que los zapateros de mar ponen los huevos son plumas, ya se trate de plumas de los pájaros que han volado por allí, caídas en el agua, o bien el mismo plumaje de un ave marina que esté durmiendo por la noche en su entorno. La hembra del zapatero puede depositar docenas de huevos en la parte inferior de una pluma de la cola del ave antes de que ésta despierte y remonte el vuelo.

El macho permanece al lado de la hembra durante la puesta. Si otro zapatero macho se acerca, la protege sacudiendo la película superficial. La frecuencia de estas señales es ligeramente superior (23 a 30 ondas por segundo) o claramente inferior (9 a 13 ondas por segundo) que las frecuencias de los signos de cortejo. El macho utiliza también las mismas señales hostiles para defender, contra otros machos, un lugar de apareamiento adecuado. Vigila su territorio agitando la superficie del agua y disponiéndose para entablar pelea si cualquier otro macho intenta penetrar dentro de un círculo de un radio de unos ocho a diez centímetros. Un zapatero macho sin territorio que proteger puede generar también su tipo de vibración en la superficie del agua para amenazar a otros machos.

En determinadas circunstancias, el zapatero llega a realizar un tipo de movimiento absolutamente distinto de su "navegación a remos". Por ejemplo, si un pez divisa un zapatero que se está comiendo una presa mojable en el agua, e intenta arrebatarle la comida, el za-




**ALGUNOS INSECTOS FORMAN GRUPOS en la superficie del agua. Los zapateros (*a*), girinos o coleópteros acuáticos (*b*) y colémbolos (*d*) suelen congregarse en grandes grupos; en cambio los fieros *Notonecta* (*c*) prefieren la soledad. Las ondas de la película superficial avisan a estos insectos de la vecindad de presas o depredadores. Konrad Wiese ha determinado que una onda de una anchura de una micra que se transmita por la superficie puede alertar a la mitad de los insectos de la superficie. Tanto los girinos como los zapateros producen sus propias ondas en**

patero saltará con toda probabilidad hacia adelante. En cuyo caso, las patas posteriores e intermedias se mueven a la vez para dar suficiente poder de propulsión a una serie de saltos que empujan al insecto hasta unos cuatro milímetros por encima de la película superficial, normalmente en dirección frontal.

Muchas especies de zapateros de agua dulce poseen tanto individuos adultos con alas como sin ellas; ahora bien, los zapateros alados suelen volar únicamente cuando deben superar cascadas, cuando el agua corre peligro de secarse o cuando podría quedar totalmente invadida por la vegetación. Los machos alados pueden volar a lo largo de varios kilómetros y, curiosamente, prefieren la noche para hacerlo. Después de haber aguantado un invierno en otro nuevo lugar absorben sus propios músculos alares a fin de obtener energía para la caza y la cópula.

Los coleópteros acuáticos *Gyrinus* y *Dineutes* viven a un nivel inferior que el que ocupan los zapateros. El cuerpo de estos coleópteros posee una superficie dura, convexa y curvada que les permite deslizarse por el agua como si fueran semillas incrustadas en la sandía; en efecto, el cuerpo está normalmente mojado por su parte inferior y seco por la parte superior, pues el insecto vive con la mitad del cuerpo en el agua y la otra mitad fuera de ella. Aunque el girino puede bucear, volar e incluso arrastrarse por una superficie sólida, pasa la mayor parte de su existencia recorriendo itinerarios zigzagueantes por la película superficial.

El mayor de estos coleópteros llega a superar ligeramente los 27 milímetros de longitud y vive en estanques y corrientes de agua del sudeste de Asia. Los ejemplares conocidos de Norteamérica y Eurasia no rebasan en ningún caso los 16 milímetros de largo. Todos estos insectos, de pequeñas proporciones, están dotados de la capacidad de desplazarse a raudas velocidades por la película superficial. Más que cortar el agua, el girino lo que propiamente hace es abrir una serie de surcos u ondas más pronunciadas, salvadas las distancias, que las que ocasiona una lancha rápida de competición. La fuerza motriz arranca de los pares de patas intermedio y posterior, funcionando cada pata como una paleta de ping-pong. Estas patas pueden remar lenta o rápidamente para impulsar al insecto hacia adelante. (Las dos patas delanteras, más largas y finas que las otras cuatro, se mantienen extendidas delante del insecto, preparadas para atrapar la presa.) Si ha de detenerse, el insecto deja que sus patas intermedias y posteriores cuelguen libremente o se muevan sólo con suavidad.

Estos coleópteros acuáticos, se inclinan hacia la derecha y/o hacia la izquierda cuando van avanzando, como si se tratara de remeros bisoños. A veces, el insecto acaba dando vueltas en torno a un mismo punto, pero con más frecuencia corrige su curso; y así es como zigzaguea por el agua. Thoreau escribió de ellos, al verlos en Walden Pond: "avanzan sin cesar por la superficie lisa, hasta alejarse medio kilómetro; al surcar ligeramente el agua, dibujan una onda clarísima, limitada por dos líneas divergentes".

Cuando un girino nada a gran velocidad puede formar hasta 14 ondas consecutivas. Las ondas originan un diseño que permanece estacionario con respecto al insecto, prolongándose por delante de su cuerpo hasta una distancia que es unas seis veces y media su propia longitud. Vance A. Tucker, de la Duke University, ha observado estos dibujos en fotografías de girinos que se desplazaban a una velocidad que va desde 23 milímetros por segundo hasta 400 milímetros por segundo, siendo esta última la velocidad máxima registrada en un girino. Tales velocidades son muy rápidas para semejante tipo de pequeños nadadores. La velocidad máxima que un hombre puede alcanzar nadando a lo largo de 1500 metros apenas si cuadriplica la velocidad máxima de un girino.

El girino distingue el rumbo que ha de seguir gracias a unos ojos compuestos, que están divididos en dos partes. La parte inferior se ocupa de los acontecimientos que se observan en el interior del agua y la parte superior de los que ocurren en la superficie o por encima de ella. El cuerpo del girino posee glándulas que protegen la parte corporal expuesta a la superficie y que mantienen la parte superior de los ojos engrasada de tal suerte que repelen el agua. La zona no expuesta y la parte inferior de los ojos no repelen el agua y, por tanto, se mojan.

El girino no recoge toda la información del medio ambiente con los ojos, sino que se sirve también de dos cortas antenas, tripartitas, que mantiene horizontales delante del cuerpo, en el lado superior de la película superficial. Las antenas detectan las ondas reflejadas por cualquier obstáculo situado delante del camino del insecto, por ejemplo, un diminuto artrópodo que se haya quedado atrapado en la película superficial. Un objeto de mayores dimensiones hace que la película superficial se combe ligeramente hacia arriba, y ello provoca que afilen las antenas; el margen de una corriente o de un embalse produce un contorno irregular en la película curvada. Las respuestas del girino son tan rápidas que puede corregir la trayectoria de su camino para encontrarse con el objeto o para evitarlo cuando incluso se halla a sólo 13 milímetros de distancia. Por otra parte, la eficacia del sistema de reflexión de las ondas posibilita que los girinos detecten límites y obstáculos en la más completa obscuridad. El sistema evita también colisiones cuando resulta que docenas o incluso centenares de girinos van zigzagueando sin adoptar ninguna formación discernible en una pequeña región de agua tranquila.

Por debajo del mundo de los coleópteros acuáticos, en los estanques de agua dulce o en remansos de corrientes rápidas, existen unos insectos, cuyo

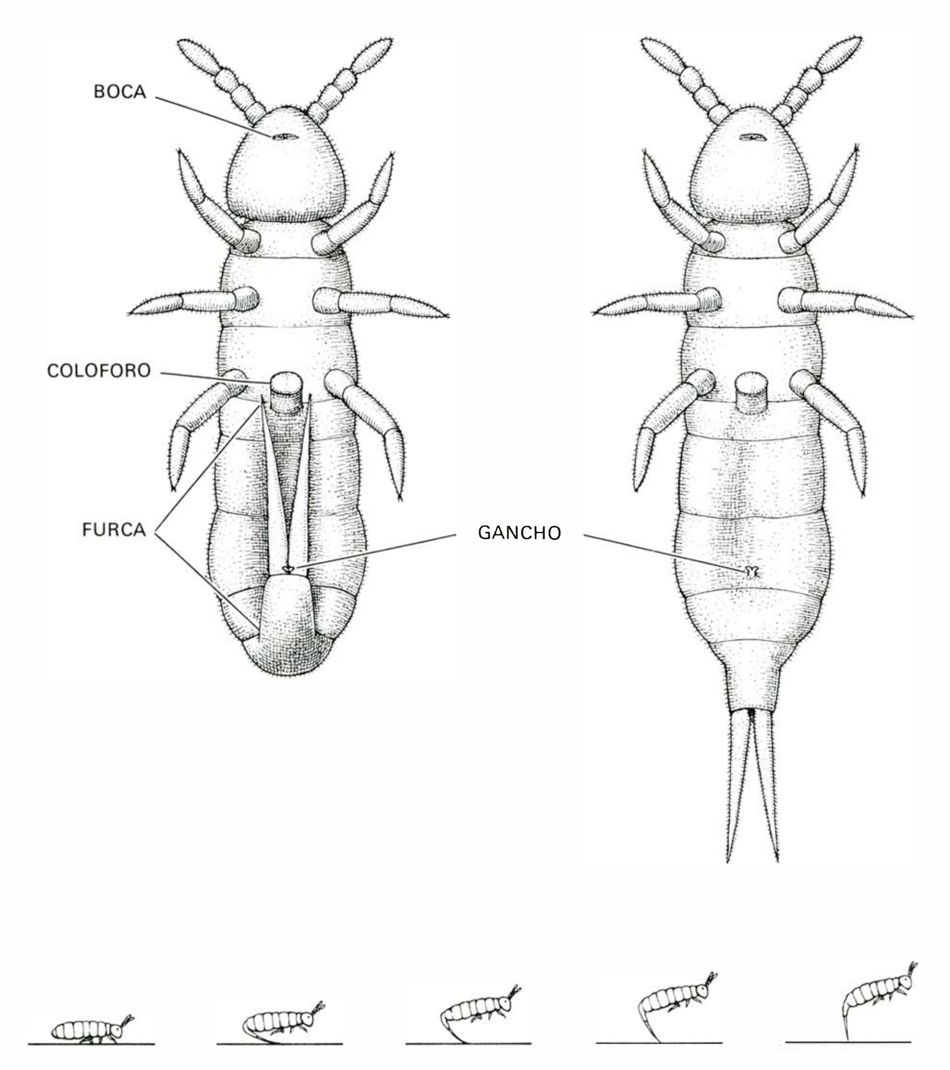
d

**el agua: el coleóptero acuático, surcando por la película superficial y, el zapatero, golpeando esta membrana con las patas intermedias para hacer señales a otros individuos de su especie.**

cuerpo recuerda el de un torpedo, que se desplazan bajo la superficie con la panza hacia arriba. Estos insectos son los fieros hemípteros del género *Notonecta.* Se trata de hemípteros heterópteros que, en su mayor parte, no alcanzan los 15 milímetros de longitud. Nadan en decúbito supino porque su principal reserva de aire se mantiene en dos entalladuras de la superficie ventral. *Notonecta* puede permanecer quieto a escasa profundidad, o bien nadar hacia adelante con sus patas posteriores que le sirven de remos.

Estas patas posteriores con función remera pueden impulsar también al insecto hacia abajo, desde la película superficial. El insecto puede explorar un embalse poco profundo recorriéndolo de arriba abajo, y se zambulle frecuentemente para depredar. Los insectos adultos tienen alas que les capacitan para volar, pueden arrastrarse sobre la tierra y, cuando ocurre alguna perturbación en el agua, pueden nadar hasta esconderse pegándose a una planta o una piedra del fondo. Resulta curioso ese hábito de ocultación en el adulto, porque está dotado para acometer acciones enérgicas y agresivas en defensa propia. Así, si un hombre que está nadando choca con un *Notonecta* en el agua, el insecto puede clavar su pico cónico en la piel de éste y lanzarle una dolorosa descarga de saliva que produce hinchazón e infección.

S. J. R. Birket-Smith, de la Universidad de Copenhague, observó que los individuos juveniles de *Notonecta* que carecen de alas reaccionan contra cualquier perturbación en el agua corriendo hacia la superficie a tomar aire. Algunos nadan tan aprisa en esa dirección que llegan a agujerear la película superficial, atravesándola, para volver a caer sobre la misma. Los jóvenes que poseen un control más refinado se detienen al llegar a la superficie; una vez allí, despliegan las largas cerdas de protección que cubren las fisuras de depósito de aire en el abdomen. Cuando estos depósitos rutilantes se han vuelto a llenar de aire, el insecto se zambulle de nuevo.




**EL COLEMBOLO tiene un cuerpo diminuto: no supera los nueve milímetros de longitud. Es hidrófugo. Se mueve por encima de la película superficial y se alimenta de esporas microscópicas de plantas que han ido a parar a dicha membrana. El colémbolo de agua dulce** *(aquí reproducido)* **está dotado de un singular aparato de salto. El extremo abdominal de su cuerpo forma un apéndice, normalmente bifurcado, que recibe el nombre de furca. La furca se halla replegada debajo del cuerpo, y queda sujetada por un apéndice especial en forma de gancho. Cuando este gancho se suelta, la furca, que se encontraba tensa, se dispara, pega contra la superficie del agua y lanza al insecto por el aire llegando a alcanzar de este modo una distancia que equivale a unas quince veces la longitud del cuerpo. La única zona del cuerpo que no repele el agua y se puede mojar es un órgano rechoncho sito en la cara ventral, que recibe el nombre de colóforo. La punta roma del colóforo, que es la que puede mojarse, se apoya sobre la superficie, a modo de ancla, lo cual evita que el viento arrastre a tan liviano insecto. El colémbolo utiliza el colóforo para la excreción de substancias y absorber agua.**

Al igual que los zapateros y los coleópteros acuáticos, los *Notonecta* obtienen información de las ondas de la película superficial. El insecto posee los sensores en las patas intermedias y mantiene éstas en la cara inferior de la película superficial. Aunque parezca estar suspendido de la superficie, en realidad es empujado hacia arriba contra la membrana superficial por propia flotabilidad. Ello explica que se produzcan pequeñas combaduras en la región de la película superficial en donde ésta se halla en contacto con los pies y la punta del abdomen.

*Notonecta* muestra el mayor interés por aquellas vibraciones de la superficie que resultan demasiado rápidas como para que las capte un zapatero. El origen de estas vibraciones de alta frecuencia puede ser una mosca o un mosquito que se encuentren en la superficie del agua, y que muevan las alas de 100 a 150 veces por segundo antes de remontar el vuelo. *Notonecta* ataca a su presa desde abajo, atravesándola con una súbita embestida de su poderoso pico. Una vez que *Notonecta* ha chupado el alimento, la piel vacía de la mosca o del mosquito es abandonada flotando. (Los mosquitos juveniles constituyen las presas preferidas por los voraces *Notonecta:* pero éstos raramente hacen honor a la fama que tienen de evitar la maduración de los mosquitos, que habrán de convertirse en transmisores potenciales de enfermedades en humanos.)

Puede darse la situación en que un *Notonecta* y un zapatero lleguen casi simultáneamente ante un insecto que haya caído y se debata en la superficie del agua. En este caso, *Notonecta* se hace con la presa, a veces tirando de ella dentro del agua, fuera del alcance del otro. Aunque *Notonecta* y el zapatero, ambos con la cara ventral dirigida hacia

la película superficial, se ven el uno al otro, casi como en un espejo, resulta que *Notonecta* es el más fuerte y tenaz de los dos.

Los fieros *Notonecta* son rara vez sociables. Cada individuo caza solo y no suele aceptar más que la presencia de otro de su especie en la época de celo. El sistema de elección de la presa efectuado por *Notonecta* contribuye al aislamiento del insecto. Hacia el final de la primavera, cuando escasean los mosquitos y otras presas pequeñas en el agua, los *Notonecta* adultos devoran a los más jóvenes, frecuentemente sin excluir a su propia prole. Este tipo de canibalismo de verano constituye el sistema de vida normal de estos insectos y limita el tamaño de la población de *Notonecta*. Este género raramente vive tiempo suficiente como para que pueda verse amenazado por la inanición. *Notonecta* o sucumbe depredado o permanece solo como único superviviente de los alrededores.

La película superficial del agua es un medio de gran antigüedad, que data de cuando cayeron las primeras lluvias sobre la tierra y se formaron charcos y pequeños depósitos de agua. Desde hace 375 a 250 millones de años viven en esta película superficial unos diminutos insectos que carecen de alas: los colémbolos. Los colémbolos, que nunca llegan a tener más de nueve milímetros de longitud, están adaptados de una manera sorprendente al medio. Sus cuerpos diminutos, hidrófugos, se aguantan con facilidad en la película superficial. Se alimentan de las esporas vegetales, microscópicas, que van a parar encima del agua y quedan allí flotando durante cierto tiempo.

Tanto los colémbolos de agua dulce de los géneros *Podura* y *Sminthurus* como los de agua marina del género *Anurida* pueden desplazarse por encima de la superficie del agua. Sin embargo, sólo las especies de agua dulce utilizan el particular sistema de locomoción que les caracteriza (el salto). El extremo abdominal de estos colémbolos de agua dulce sufre un ensanchamiento hasta que llega a alcanzar casi las proporciones de la cola de un castor; el insecto puede disparar esta cola especial contra la superficie a fin de alejarse, de un salto, del posible peligro.

El mecanismo del salto funciona de la siguiente manera. Se curva hacia delante el extremo abdominal y se mantiene firme por un gancho, cual si dibujaran una trampa ratonera. El extremo del abdomen se sujeta tenso contra el gancho, de manera que cuando éste se suelta, se dispara el abdomen contra la superficie del agua, repeliendo el aire el liviano cuerpo del insecto. Este mecanismo puede lanzar el cuerpo del colémbolo hasta una distancia de quince veces la longitud del cuerpo. (Hay gran cantidad de colémbolos que poseen anatomías sólo ligeramente distintas, que viven en tierra firme y efectúan saltos muy parecidos.)

A pesar de que el colémbolo puede permanecer y desplazarse sobre la película superficial del agua, porque su envoltura externa es hidrófuga, existe una parte del cuerpo que desempeña un importantísimo papel gracias a que ella sí puede mojarse. Se trata de un órgano rechoncho, sito en el abdomen del colémbolo, cerca de sus patas posteriores, que recibe el nombre de colóforo. El colémbolo se preocupa de que el extremo romo del colóforo esté en contacto con la película superficial. Este extremo del colóforo es la zona que puede mojarse; le sirve de ancla para que su cuerpo liviano no se vea arrastrado por el viento. Según parece, el colémbolo utiliza el colóforo para intercambiar substancias a través del colóforo: recoger agua y despojarse de substancias de desecho.

Las relaciones que establece el colémbolo con el agua que se halla por debajo de la película superficial no se conocen todavía bien. Hace un siglo, un naturalista sueco, Charles de Geer, introdujo unos cuantos colémbolos de la especie *Podura aquatica* en un cuenco hondo de agua.

Observó que varias veces al día los delicados insectos se sumergían hasta el fondo del acuario y parecían chupar los jugos de las plantas sumergidas. Hasta hoy nadie se imagina cómo pueden atravesar estos insectos la membrana superficial y, según se supone, cómo llegan a refugiarse en el lodo de los charcos para hibernar.

El colémbolo *Podura aquatica* se encuentra distribuido en las superficies del agua dulce de la Zona Templada de Eurasia y de Norteamérica y penetra más arriba, hasta la tundra ártica. Se trata de la especie de colémbolo que más abunda en las aguas dulces. En Nueva Inglaterra, durante los meses de octubre y noviembre, podemos ver a una multitud de ellos en los márgenes de casi todos los embalses o corrientes tranquilas. Mientras no nos acerquemos demasiado, permanecerá formando un cordón en la orilla, dibujando una banda envolvente de color obscuro de unos siete a diez centímetros de ancho. La onda que produce una mano basta para alarmar a un extenso grupo de ellos. Huyen en diferentes direcciones disparando los abdómenes tensos sobre la superficie del agua, hasta desaparecer por completo de nuestra vista. Si seguimos observando sin movernos, estos colémbolos gregarios volverán a reunirse lentamente.

Los colémbolos marinos también son sociables. Por ejemplo, el colémbolo de color azul y gris *Anurida maritima,* que habita en las marismas y en costas rocosas, mide sólo unos tres milímetros de longitud, pero llega a reunirse en tan gran número que pueden tapizar completamente la superficie de cualquier embalse de agua que haya dejado la marea o cualquier charco de una marisma. Ralph Dexter, de la Universidad estatal de Kent, cuenta que en ciertas épocas es normal hallar en estos lugares una densidad de 100 individuos por pulgada cuadrada (una pulgada equivale a 25,4 milímetros).

Hace un siglo, el naturalista inglés Thomas Belt comentó la notable semejanza existente entre los animales y las plantas de la superficie del agua dulce en Nicaragua con las especies que le eran familiares a él en Europa. Las condiciones de vida son mucho más uniformes en las superficies de las aguas dulces que lo puedan ser en las zonas firmes que rodean a las mismas. Cuando alguien que se interesa por los animales y las plantas visita una región del mundo alejada de la suya, se sentirá como en casa si pasea en bote por un estanque o un río. Allí estarán todos: colémbolos, zapateros, *Notonecta* y girinos.

Los insectos de la superficie del agua frecuentan los charcos temporales de la tundra polar, pero se encuentran también en las aguas que dan albergue a las truchas, mucho más al sur. Los hemos contemplado, desde una canoa, en Panamá, donde prosperan a pesar de los ejércitos de hormigas, pájaros y otros depredadores que habitan en la selva de la cercana orilla. Hemos visto a estos insectos o a otros de su mismo tipo en una estrecha represa entre dos arrozales en Filipinas y en el margen de un estanque con poca agua, sobre areniscas en una zona árida de Australia. Y no llegan a faltar en otros hábitat poco adecuados de Hawaii, Nueva Zelanda, Islandia, Africa y en el hemisferio occidental desde Alaska hasta las Islas Malvinas, más allá de la punta meridional de Sudamérica.

# Ciencia y sociedad

## *Derecho marítimo*

Durante los últimos cinco años, los delegados de 148 naciones, en sesiones intermitentes de la Tercera Conferencia de las Naciones Unidas sobre derecho marítimo y de sus comités, han intentado forjar un amplio sistema para el gobierno de los océanos. La conferencia ha logrado avanzar en varios temas, verbigracia: la salvaguardia de la tradicional libertad en alta mar dentro de los límites de las 200 millas de aguas territoriales reclamadas por un creciente número de naciones, disposiciones para que barcos extranjeros pasen a través de estrechos que están bajo jurisdicción nacional y otras sobre control ambiental. Pero la conferencia está empantanada en ciertos asuntos, entre los cuales hay uno principalísimo: el régimen que habrá de establecerse para explotar los vastos recursos minerales de los fondos oceánicos.

En esto se ha producido una polarización entre algunas naciones desarrolladas (incluyendo los Estados Unidos) por una parte y por la otra un conjunto de naciones en vías de desarrollo conocido como el "Grupo de los 77" (aunque consta con más de 100 miembros). El desacuerdo se centra en tres puntos principales: el sistema de minería, el grado en que debería limitarse la producción de minerales del fondo marino y el gobierno de las instituciones internacionales creadas para administrar la minería submarina. Respecto de la minería, las naciones desarrolladas propugnan que se permita a compañías cualificadas y empresas estatales el acceso a los minerales del fondo oceánico, mientras que el Grupo de los 77 querría dejar la minería exclusivamente bajo la administración de la propuesta Autoridad Internacional de Fondos Marinos y de su rama operativa, conocida por "la Empresa". Por lo que se refiere al control de la producción, las naciones desarrolladas preconizan en general una política liberal en tanto que las naciones en vías de desarrollo proponen otra de carácter restrictivo. En cuanto al gobierno, las naciones desarrolladas quieren que la autoridad de fondos marinos refleje no sólo los deseos de los gobiernos miembros, sino también los intereses de grupos tales como productores, inversionistas y consumidores; las naciones en vías de desarrollo propugnan el principio de una nación, un voto.

La Conferencia comenzó en Ginebra su séptima sesión el 28 de marzo último. Ante ella se expuso un voluminoso "texto compuesto e informal de negociación", que consta de un preámbulo, 303 artículos y siete apéndices. El texto lo publican el presidente de la Conferencia y los directores de sus tres comités. Sus cláusulas sobre los suelos marinos han sido descritas como "fundamentalmente inaceptables" por parte de los representantes estadounidenses.

Antes del inicio de la sesión, el embajador Elliot L. Richardson, jefe de la delegación norteamericana, al repasar la situación, en una entrevista mantenida en Cincinnati comentó: "En la vida de las conferencias internacionales llega un momento en el cual los elementos de las negociaciones están dispuestos de modo tal que tras un debate exhaustivo y agotador, hay un compromiso justo a nuestro alcance... La Conferencia ha alcanzado ese momento". Señalando el acuerdo de la Conferencia acerca de que los recursos de los fondos marinos son herencia común de la humanidad, que su explotación debería ser administrada, en nombre de toda la humanidad, por una autoridad internacional adecuadamente designada y que los países en vías de desarrollo deberían compartir los resultados de esa minería, agregó: "Si se alcanzan compromisos justos sobre el primero de los dos temas clave acerca de los fondos marinos –la explotación y la política de recursos– será sobre la base de arreglos que reflejen con justicia los intereses legítimos en debida proporción a su verdadero peso. Se deduce que un compromiso justo sobre el tema de gobierno debe apoyarse en la creación de un Consejo que actúe como rama ejecutiva de la Autoridad cuyos miembros, poderes y procedimientos de votación puedan conseguir la misma clase de arreglo".

## *Supermasa*

La galaxia elíptica gigante M87, que se halla a sólo 50 millones de años luz de distancia y es, por tanto, casi vecina de nuestra propia galaxia, interesa a los astrónomos por numerosos motivos. Es el miembro más brillante del cúmulo de Virgo, compuesto por 130 galaxias, y también una de las más brillantes que se conoce. Emite asimismo con gran potencia en las regiones de rayos-X y de radiofrecuencia del espectro. Desde el núcleo de la galaxia se proyecta hacia fuera un chorro singular a 5000 años-luz. Toda esta actividad energética sugiere un estrecho parecido entre M87 y los quasar, más distantes y superluminosos. Además, al igual que otras muchas galaxias gigantes, M87 parece ser deficitaria en cuanto a masa: para que un cúmulo de galaxias como Virgo se mantenga unido por fuerzas gravitacionales, M87 y sus compañeras deberían tener de 10 a 30 veces más masa de la que podría explicarse fácilmente según su luminosidad. Una de las hipótesis afirma que la masa faltante tiene la forma de un prolongado "halo" de estrellas demasiado débil como para aparecer en las fotografías ordinarias.

Un estudio reciente de M87, realizado con técnicas ultrasensibles de recuento de fotones, ha revelado pruebas de la característica más notable de todas hasta la fecha: una concentración no luminosa de masa en el núcleo de la galaxia, equivalente a unas 5000 millones de veces la masa del Sol. Aunque la concentración de masa nuclear es menor que la presunta masa faltante en varios órdenes de magnitud (déficit que quizá se descubra en el halo que rodea a la galaxia conforme continúe la investigación), la masa detectada en el núcleo de M87 podría ser un agujero negro con una masa enormemente mayor que cualquiera de la media docena de agujeros negros (la masa de cada uno de los cuales probablemente no alcanza a 10 veces la del Sol), cuya existencia se postula como acompañantes obscuros en sistemas de estrellas binarias. El anuncio del descubrimiento de la gran masa central de M87 apareció en la edición de abril de *The Astrophysical Journal,* presentado por un grupo de seis astrónomos: Wallace L. W. Sargent y Peter J. Young, de los Observatorios Hale y del Instituto de Tecnología de California; A. Boksenberg y Keith Shortridge, del University College de Londres; Clarence R. Lynds, del Observatorio Nacional de Kitt Peak, Estados Unidos, y F.D.A. Hartwick, de la Universidad de Victoria, Australia.

El estudio de M87 se efectuó paralelamente con observaciones de una galaxia elíptica "normal", la NGC 3379, que sirvió como control de referencia. Aunque se parece externamente a M87, NGC 3379 no es emisora de radiofrecuencias y tampoco es notable en otros aspectos. A M87 se la observó con el telescopio de 4 metros de Kitt Peak, a NGC 3379 con el telescopio Hale de 5,08 metros de Monte Palomar. Ambos telescopios están dotados del nuevo

sistema de recuento de fotones, creado en el University College de Londres, que usa fotocátodos sensibles en vez de emulsiones fotográficas para el registro de los espectros del objeto en estudio. La gran ventaja del sistema enteramente electrónico estriba en que puede registrar alrededor del 20 por ciento de todos los fotones que intercepta. Las emulsiones fotográficas capturan sólo alrededor del 5 por mil. Por tanto, el tiempo de observación se hace 40 veces menor. Aun así, la observación de las dos galaxias llevó 16 horas.

El diseño del experimento exigía no sólo una búsqueda de halos galácticos, sino también el examen de los núcleos de las dos galaxias, que hasta entonces se habían venido estudiando únicamente con técnicas fotográficas. Los investigadores confiaban en que con el sistema de recuentos de fotones se podría mejorar muchísimo respecto de las mediciones de las velocidades de estrellas situadas en los núcleos de las galaxias. La dispersión o gama de velocidades sirve también como sensible indicador de la cantidad de masa presente en determinado volumen; cuanto mayor sea el promedio de las velocidades, tanto mayor será la masa conjunta que se precisa para mantener las estrellas confinadas en dicho volumen. La masa calculada puede compararse entonces con la luz emitida desde el mismo volumen de espacio, a fin de obtener una relación entre masa y luminosidad, para expresar las cuales se suelen usar como unidades la masa y la luminosidad del Sol.

En el núcleo de la galaxia normal NGC 3379, la relación masa/luz medida fue de seis a uno, aproximadamente. La relación comparable hallada para M87 es unas 10 veces mayor. En otras palabras, en el núcleo de M87 hay al parecer alrededor de 60 unidades solares de masa invisible por cada unidad solar de luminosidad. Cuando esta relación se calcula para un volumen central cuyo radio es de 110 parsecs (360 años-luz), la cantidad de masa no luminosa alcanza a 5000 millones de masas solares, de las cuales no más del dos por ciento puede tener la forma de estrellas normales de las que pueblan el resto de M87. Esto supone 25 masas solares por año-luz cúbico. Esa densidad no es excepcional en núcleos galácticos, pero la implicación de que la mayor parte de la masa ha de ser obscura resulta singular. Los autores concluyen: "La presencia de un agujero negro central supermasivo debe ser (considerada como) una seria posibilidad".

La hipótesis podrá someterse a prueba en pocos años más con el Gran Telescopio Espacial, que poseerá una resolución 10 veces mayor que la de los instrumentos situados en la Tierra y que, por tanto, podría resolver los 10 parsecs centrales del núcleo de M87. Si se descubre que la masa obscura está confinada en ese radio limitado (un volumen 1000 veces menor que el establecido por las observaciones actuales), la posibilidad de un agujero negro galáctico será muy convincente.

## *Quinta rueda*

Las exigencias de una mayor economía de consumo de combustible han inducido a los fabricantes de automóviles a recortar el peso de sus vehículos de diversas maneras, como, por ejemplo, reemplazando metales por plásticos y el hierro por aluminio. Un candidato principal ha sido el neumático, porque las mejoras en su diseño ofrecen posibles ahorros de combustible de dos clases.

Los cambios de diseño que suponen una menor resistencia al rodaje pueden ocasionar ahorros de combustible del orden del 10 por ciento. Los cambios que permiten que un nuemático pinchado pueda rodar desinflado sin peligro o que impiden que se aplane aun cuando no contenga aire ofrecen una inesperada ventaja a los fabricantes de coches: la eliminación del neumático de repuesto. Al eliminar éste se eliminan, por supuesto, la llanta de repuesto y el gato. Estos cambios conllevan una economía en la fabricación y pueden restar hasta 30 kilogramos al peso del coche.

La corriente en pro la supresión del neumático de repuesto ya ha conducido a adoptar soluciones intermedias, tales como el proporcionar repuestos miniaturizados. Unos vienen desinflados, junto con un bote de gas inflador a presión; otros están preinflados, pero son más pequeños que el neumático que reemplazan. Los clientes han recibido todas estas novedades con apatía u hostilidad.

Pero ahora que existen numerosos neumáticos que pueden rodar deshinchados y está en período de prueba al menos uno que no se deshincha, puede que se esté terminando la época de soluciones a medias. La mayoría de los dueños de coches privados continuarán exigiendo por cierto tiempo el apoyo psicológico de una quinta rueda, pero los patronos de flotas, como las compañías de coches de alquiler sin conductor y los organismos de los gobiernos, darán la bienvenida a la eliminación del repuesto.

# El nacimiento de estrellas de gran masa

*El nacimiento de estrellas mucho más calientes y de mayor masa que el Sol puede venir desencadenado por ondas de choque al atravesar éstas grandes nubes frías de gas y de polvo interestelar*

Michael Zeilik

Las masas de las estrellas de nuestra galaxia están comprendidas entre una centésima de la masa del Sol y un centenar de masas solares. Las estrellas de menor masa tienen una vida media del orden de la edad del universo: decenas de miles de millones de años: transcurridos los cuales, palidecen lentamente hasta convertirse en frías cenizas. Las estrellas de gran masa tienen vida media de sólo algunos millones o decenas de millones de años, al cabo de los cuales estallan de modo catastrófico. Durante el corto intervalo de sus vidas, el horno termonuclear que existe en sus profundidades fabrica elementos tan pesados como el carbono y el helio: a su muerte, la terrible violencia de la explosión de supernova forja elementos más pesados que el hierro y arroja hasta un 90 por ciento del material de la estrella al espacio interestelar. Nuevas estrellas y planetas nacerán a partir de este material reciclado: estrellas como el Sol y planetas como la Tierra. Lo que es más, la vida surgió en nuestro planeta debido a que estrellas de gran masa nacieron y murieron: sin explosiones de supernova, el carbono, que es la clave de la vida tal como la conocemos, no estaría distribuido a través del espacio interestelar.

Puesto que las convulsiones agónicas de las estrellas de gran masa resultan consiguientemente de importancia crucial para la evolución cósmica, tales estrellas plantean cuestiones fundamentales para la astronomía. ¿Cómo nacen las estrellas de gran masa? ¿Dónde nacen? ¿Cómo se dan las condiciones adecuadas para su crecimiento? Durante los últimos años, nuevos radiotelescopios y telescopios de infrarrojo han posibilitado que muchos astrónomos sondearan los lugares de nacimiento de estrellas de gran masa. Observaciones recientes parecen indicar que el crecimiento de tales estrellas viene desencadenado secuencialmente por ondas de choque al atravesar gigantescas nubes de gas y polvo interestelares.

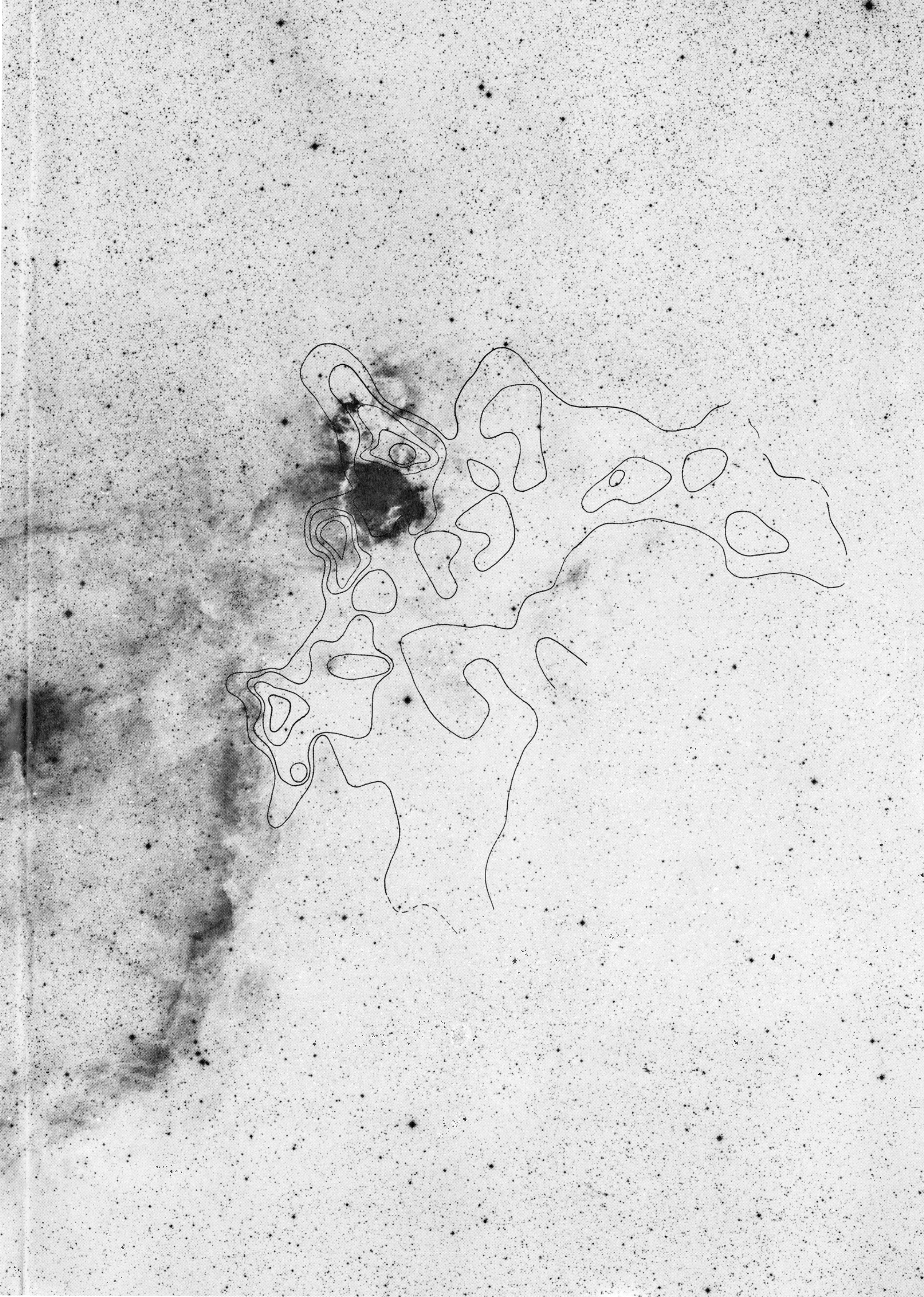
Las estrellas de gran masa son estrellas gigantes, blancoazuladas, de los tipos espectrales O y B. La temperatura superficial de esas estrellas es muy superior a la del Sol: entre 16.000 y 45.000 grados Kelvin. (La temperatura superficial del Sol es de 6000 grados Kelvin.) Tales estrellas son también entre 800 y 500.000 veces más luminosas que el Sol. Sus masas están comprendidas entre unas seis y unas 60 masas solares. Un rasgo específico de las estrellas Tipo O y Tipo B es que la mayoría de ellas están situadas en los brazos espirales de la galaxia.

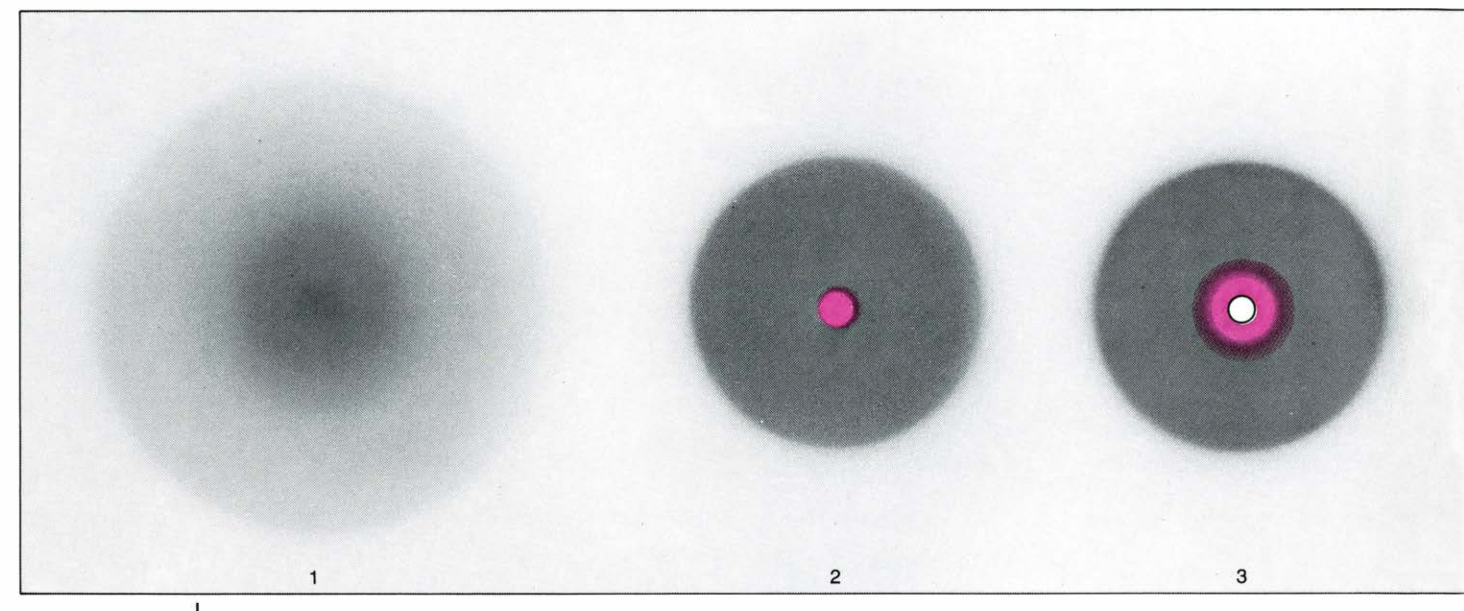
¿Dónde y cómo se forman las estrellas Tipo O y Tipo B? Para responder a esta pregunta se necesita primero una visión de conjunto de cómo puede esperarse que nazcan estrellas de gran masa. En la formación de estrellas subyace un concepto físico simple: el de la inestabilidad gravitatoria. La idea no es nueva: Newton fue el primero en descubrirla, en las postrimerías del siglo XVII.

Imaginemos una nube de gas, uniforme y estática, en el espacio. Supongamos luego que el gas se perturba por algún procedimiento, de suerte que una pequeña región esférica se haga un poco más densa que el gas que la rodea; en virtud de lo cual, el campo gravitatorio de esa pequeña región se tornará un poco más intenso. Al atraer en ese momento más materia hacia sí, su gravedad seguirá aumentando; ello provocará una más decidida contracción. Al contraerse, su densidad crecerá, lo cual incrementa aún más su gravedad, de modo que capturará nueva materia y se contraerá todavía más. El proceso contianuará hasta que la pequeña región del gas forme finalmente un objeto gravitatoriamente ligado.

Esta visión sencilla adolece de una seria complicación, que fue apuntada en primer lugar por James Jeans a principios de siglo: el papel de la presión interna del gas. La presión interna del gas proviene de colisiones entre las partículas que encierra y es directamente proporcional a la temperatura y a la densidad de éste. La presión interna dispersa la esfera de gas desde su interior. Una nube de gas que se contraiga bajo la fuerza de su propia gravedad se calentará de-

**LAS INCANDESCENTES NEBULOSAS DE CASIOPEA, que se conocen por IC 1795 e IC 1805, son lugares primarios de nacimiento de estrellas gigantes calientes, blancoazuladas, de los Tipos O y B. En esta copia en negativo, hecha con el telescopio Schmidt de 48 pulgadas de Monte Palomar, las nebulosas aparecen negras: IC 1795 es la parte densa de la nube cercana al norte *(centro)* de la fotografía, e IC 1805 es el núcleo denso sito hacia el sureste *(izquierda, en medio)*. El gas incandescente de las nebulosas consta en gran parte de átomos de hidrógeno que han sido ionizados, o disociados, por la radiación ultravioleta de las estrellas inmersas en sus profundidades. El hidrógeno ionizado se designa por H II y las nebulosas incandescentes se conocen como regiones H II. Las propias estrellas de gran masa están ocultas, en las longitudes de onda visibles, por el gas y el polvo. La fotografía muestra que IC 1795 e IC 1805 son, en realidad, parte de un gran complejo de gas y polvo. Se trata también de emplazamientos de radioemisión y sus componentes a esas longitudes de onda han sido designadas por W3 y W4, respectivamente. Las curvas de nivel, que configuran la presencia de monóxido de carbono (CO), indican que, al oeste *(derecha)* de las nebulosas, hay una gran nube molecular invisible. Dos concentraciones de curvas de nivel, justo encima y debajo de IC 1795, son emplazamientos de intensa radioemisión; la de arriba es W3 A y la de abajo W3 OH. Se trata de regiones que están colapsando para formar nuevas estrellas de gran masa.**






| | | | |
|---|---|---|---|
| ETAPA EVOLUTIVA | LA NUBE PREESTELAR COLAPSA | LA ESTRELLA FRIA MUY JOVEN BRILLA DEBIDO A LA CONTRACCION GRAVITATORIA | LA ESTRELLA INICIA EN SU NUCLEO LA FUSION TERMONUCLEAR |
| JALONES OBSERVACIONALES | NUBE MOLECULAR DENSA Y FRIA; FUENTES DE RADIOEMISION A PARTIR DE MOLECULAS COMO, POR EJEMPLO, EL MONOXIDO DE CARBONO (CO) | FUENTE COMPACTA EN EL INFRARROJO LEJANO, ASOCIADA CON RADIOEMISION DE LA NUBE MOLECULAR, A PARTIR DE HIDROXILO (OH) Y AGUA ($H_2O$). | FUENTE COMPACTA EN EL INFRARROJO CERCANO Y RADIOFUENTE EN LA NUBE MOLECULAR |
| DURACION (AÑOS) | 300.000 | 25.000 | 25.000 |

**NACIMIENTO de una estrella de gran masa. Tiene lugar en una secuencia de etapas, cada una de las cuales parece un jalón observacional distinto. En la primera etapa, una onda de choque hace que una parte de una nube grande, fría, de gas y de polvo** *(gris intermedio)* **se vuelva gravitatoriamente inestable; esa región** *(gris obscuro)* **empieza a colapsar** *(1)*. **Al colapsar, se vuelve más caliente y más densa** *(2)*, **hasta que empieza a brillar en rojo** *(círculo de color)* **debido al calor liberado por el colapso gravitatorio. Comienza la fusión termonuclear en el núcleo de**

bido a que la energía gravitatoria de la materia que cae se transforma en calor. Así pues, una región del gas que se contrae tiene una presión interna mayor que su entorno tanto por su mayor densidad como por su mayor temperatura. Para que el tirar hacia dentro de la gravedad gane y el gas se configure como un objeto gravitatoriamente ligado, lo que es una estrella, debe vencerse el empuje hacia fuera de la presión interna. Básicamente, la gravedad vencerá cuando la región perturbada sea lo bastante grande como para que tenga masa suficiente que se contraiga, pese a su presión interna.

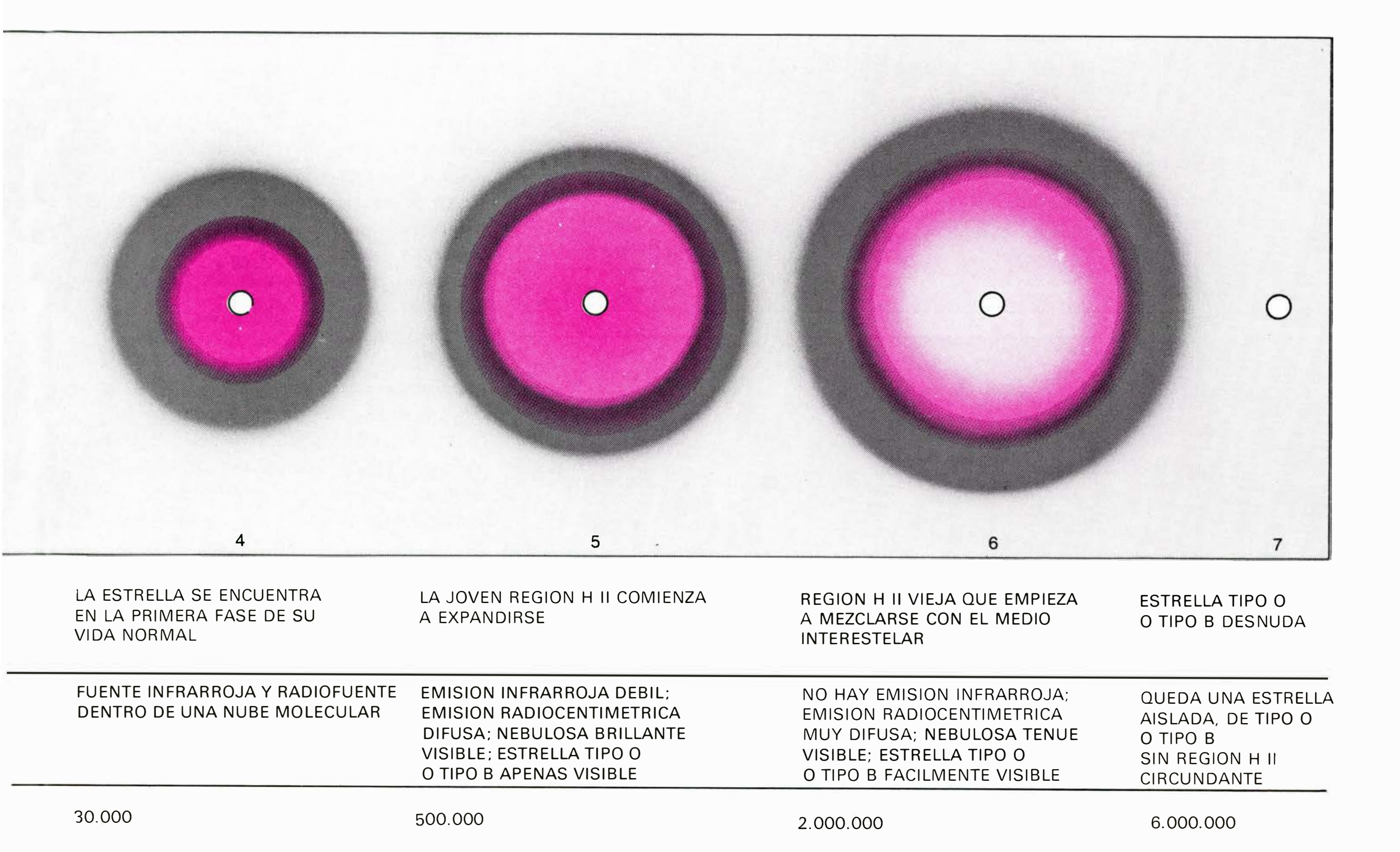
Supongamos, de momento, que esas condiciones pueden cumplirse en una nube de moléculas del espacio interestelar, y consideremos la nube antes y después de que se haya producido la inestabilidad gravitatoria. ¿Cómo evolucionará, hasta formar una estrella, la porción gravitatoriamente inestable de la nube?

La teoría dice que la estrella en formación progresará a través de varios estadios evolutivos y que cada estadio viene marcado por diferentes jalones observacionales, los cuales pueden identificarse por medio de diversas clases de telescopios. Permítaseme esbozar una posible secuencia de acontecimientos para el nacimiento de una estrella aislada de gran masa, a fin de mostrar cuáles son los jalones que anuncian las diferentes etapas de su formación.

Las nubes moleculares a partir de las cuales han nacido estrellas de gran masa constan de granos de polvo y moléculas de gases, como el hidrógeno molecular ($H_2$), el radical hidroxilo (OH), hidrocianuro (HCN) y monóxido de carbono (CO). La mayoría de las moléculas son de hidrógeno. El polvo de la nube está mezclado en ella con el gas y, por término medio, hay cerca de un gramo de polvo por cada $10^{12}$ átomos de gas. Una nube molecular típica puede tener un diámetro de decenas de parsecs (un parsec equivale a 3,26 años luz), una masa 100.000 veces la del Sol, una densidad de 1000 moléculas por centímetro cúbico y una temperatura de 15 o 20 grados Kelvin. El jalón observacional para un estadio preestelar es la emisión, por parte de las múltiples moléculas de la nube, de radioondas a longitudes medidas en la gama de los milímetros.

Imaginemos una porción de una tal nube que se vuelva gravitatoriamente inestable por algún procedimiento. La parte inestable se contrae, se hace más densa y se calienta. El núcleo del fragmento aumenta su densidad más rápidamente que sus capas exteriores, colapsa más de prisa que dichas capas y se calienta en seguida: en 10.000 o 100.000 años, la temperatura interna alcanza los ocho o 10 millones de grados Kelvin (la temperatura de ignición para las reacciones termonucleares). Cuando se encienden los fuegos nucleares, generan tanto calor que la presión interna en el núcleo del fragmento aumenta lo suficiente como para detener el colapso gravitatorio. Ha nacido una estrella de gran masa.

De acuerdo con la teoría, al principio, la estrella de gran masa recién formada tiene una temperatura superficial baja, pero una alta luminosidad. Cuando la estrella evoluciona, su temperatura aumenta rápidamente, pero su luminosidad




**la estrella *(3)* y la temperatura de la superficie aumenta hasta que la estrella se hace blanca o azul *(círculo blanco)*. La energía de la estrella calienta el gas circundante; al cabo de unas decenas de miles de años la joven estrella emite ya tanta radiación ultravioleta que empieza a ionizar el gas de la nube a su alrededor *(4)* para formar una región H II *(color claro)*. El gas calentado de la región H II comienza a expandirse hacia fuera, dentro de la nube molecular fría *(5)*, hasta barrer gran parte de ésta *(6)* hacia el medio interestelar *(gris claro)*, dejando la estrella desnuda *(7)*.**

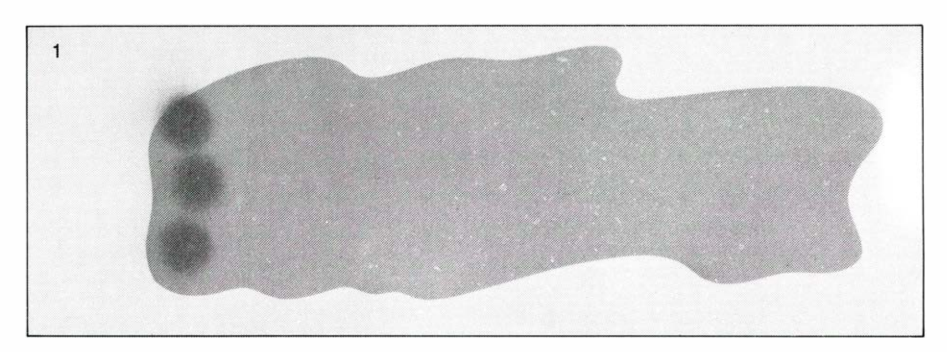
permanece casi constante. Así, por ejemplo, una estrella con una masa que sea 15 veces la del Sol comienza su vida con una temperatura superficial de unos 4000 grados K y una luminosidad unas 10.000 veces mayor que la del Sol. En sólo 140.000 años, aproximadamente, su temperatura superficial asciende hasta 32.000 grados K., aproximadamente, si bien su luminosidad aumenta sólo alrededor de un 60 por ciento, es decir, hasta unas 16.000 veces la luminosidad del Sol.

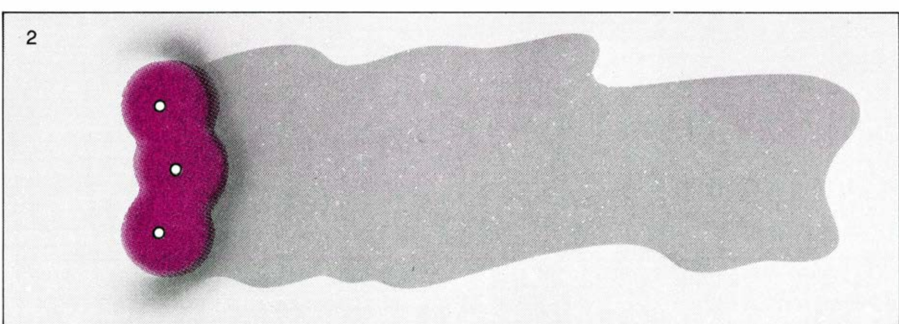
¿Cómo puede detectarse una estrella "niña" de gran masa? No puede descubrírsela, en longitudes de onda visible, inmediatamente después de su nacimiento. Y ello porque se halla todavía velada por el polvo circundante. Su evolución, de tener una superficie fría a tenerla caliente, afecta, sin embargo, al gas y al polvo que la envuelven, y lo hace de suerte que eso sí puede observarse. El proceso físico clave es que cuando la temperatura de la superficie de una estrella aumenta, emite una parte cada vez mayor de su radiación en forma de más altas energías, es decir, de longitudes de onda más cortas. Por ejemplo, cuando la temperatura superficial de la estrella de 15 masas solares pasa de 4000 a 32.000 grados, el pico de su flujo se desplaza, desde una longitud de onda de 7000 angstroms, en la región roja del espectro visible, a otra de 910 angstroms, en el ultravioleta.

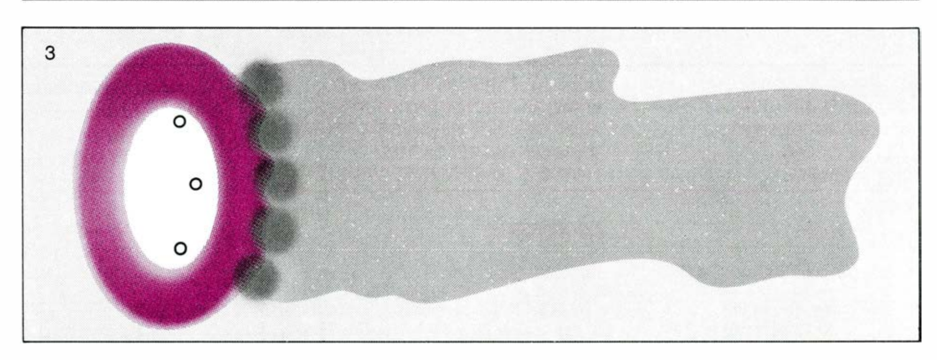
¿Cómo incide este corrimiento en el gas y el polvo que rodean a la estrella? Primero, ésta emite principalmente luz roja de baja energía. El polvo absorbe con facilidad la luz, bloqueando con ello la imagen directa de la estrella en las longitudes de onda visible. Sin embargo, y en virtud de que los granos de polvo absorben la energía de la estrella, éstos se calientan. Al ser baja la energía que absorben, alcanzan una temperatura de sólo unos 30 o 50 grados K. A esas temperaturas los granos de polvo emiten casi toda su radiación en la región infrarroja lejana del espectro: radiación con una longitud de onda de 100 o más micras. Por tanto, el primer signo que nos señala la presencia de una estrella recién nacida en una nube molecular es una fuente compacta de emisión infrarroja lejana.

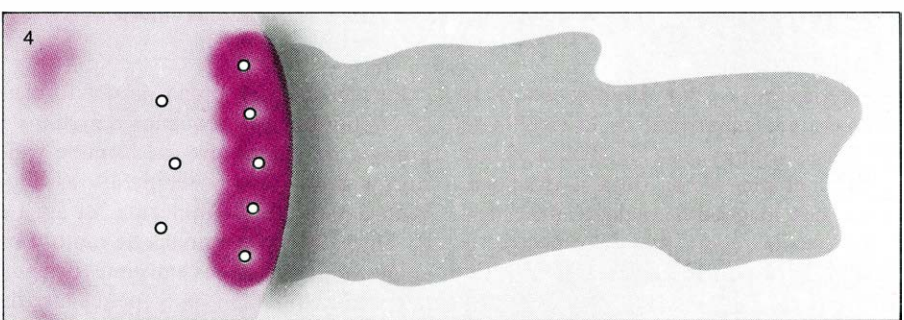
En esta etapa temprana, pueden formarse temporalmente pequeños remolinos o grumos de gas dentro de la nube y alcanzar densidades y temperaturas adecuadas para que las moléculas de agua y de hidroxilo emitan ondas de radio. Los emplazamientos de las emisiones de agua y de hidroxilo son muy pequeñas de las dimensiones del sistema solar, aproximadamente; y resulta probable que la duración de su existencia no cumpla los 10.000 años. Esta emisión puede observarse fácilmente con radiotelescopios y marca el lugar de nacimiento de una nueva estrella.

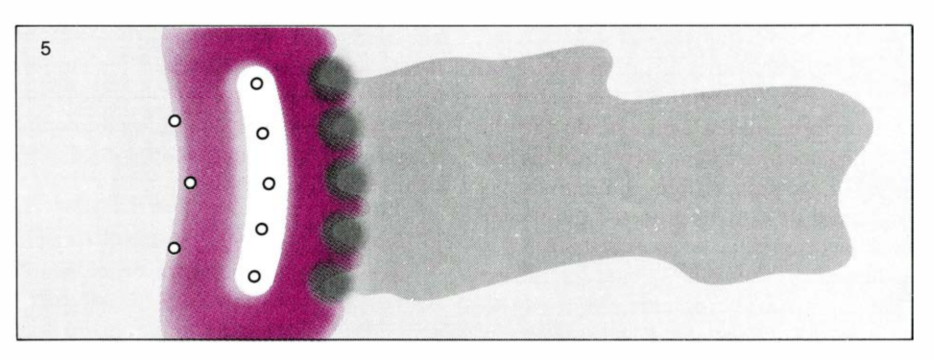
Cuando la estrella "infantil" evoluciona y la temperatura de su superficie aumenta, el polvo que la rodea debe absorber radiación de más alta energía. Esa radiación eleva la temperatura del polvo hasta situarla entre 100 y 150 grados K. A esa temperatura, el polvo de una pequeña región en torno a la estrella irradia la mayor parte de su energía en la región infrarroja cercana del espectro: radiación de longitudes de onda comprendidas entre 10 y 30 micras. El polvo situa-



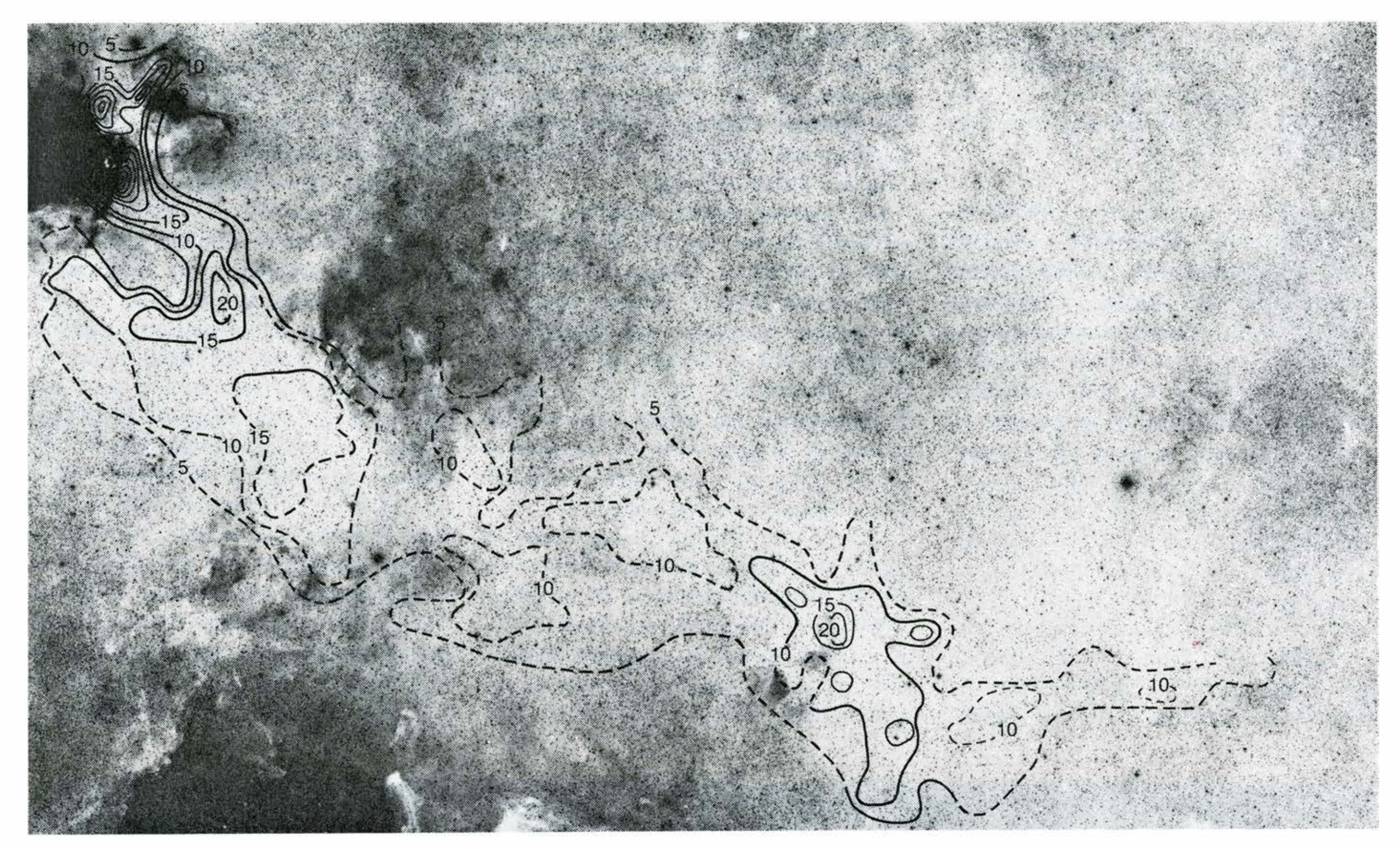

**LAS ESTRELLAS DE GRAN MASA se forman por grupos, conocidos por asociaciones OB, y no aisladamente. Una onda de choque induce inestabilidad gravitatoria en uno de los bordes de una nube molecular** *(gris intermedio).* **La onda de choque, por lo general, provoca que una capa de gas empiece a colapsar y forme estrellas** *(1).* **Sus regiones H II en expansión** *(color)* **crean sus propias ondas de choque, las cuales viajan a través de la nube, barriendo tras sí el material** *(2).* **A veces, la densidad de la nueva capa de material es lo bastante grande como para que ésta sea gravitatoriamente inestable, se fragmente y empiece a colapsar hacia una segunda generación** *(3).* **Esas nuevas estrellas pueden crear regiones H II, las cuales se expanden** *(4),* **formando ondas de choque que se sumergen en la nube interestelar** *(5);* **ello induce la formación de una tercera generación** *(derecha);* **mientras, las generaciones antiguas han seguido evolucionando hacia la madurez** *(izquierda).*

do en la zona periférica se calienta menos y emite, sobre todo, radiación infrarroja lejana. Así pues, la etapa de mayor temperatura superficial en la evolución de una estrella de gran masa viene anunciada por la presencia de una fuente compacta de emisión infrarroja cercana, rodeada por una fuente más extensa de emisión infrarroja lejana.

Con el tiempo, la estrella empieza a emitir grandes cantidades de radiación ultravioleta. Los fotones ultravioleta actúan de dos maneras sobre el gas de la nube molecular. Primero, la radiación disocia moléculas de hidrógeno en átomos. Segundo, cuando la estrella comienza a emitir fotones con una longitud de onda inferior a los 912 angstroms, la radiación ultravioleta inicia la ionización de los átomos de hidrógeno, disociándolos en sus constituyentes protones y electrones. El hidrógeno ionizado se designa por H II, por lo que la zona de hidrógeno ionizado que se forma en las inmediaciones de la estrella se conoce como una región H II. En la región H II, electrones libres pasan rozando protones (los núcleos de hidrógeno) y generan ondas de radio con una longitud de un centímetro, aproximadamente. Las ondas de radio centimétricas penetran fácilmente en el polvo que resguarda la estrella, por lo que en esa etapa de la evolución de la estrella su presencia viene marcada por una región compacta de radioemisión centimétrica. Mientras tanto, el polvo entremezclado con el hidrógeno ionizado de la región H II sigue emitiendo radiación infrarroja cercana.

Alrededor de la estrella, los fotones ultravioleta absorbidos por el gas calientan la región H II a unos 1000 grados Kelvin, por lo que en esta región la temperatura es mucho mayor que el gas que la rodea. La región H II caliente se expande, presionando la nube molecular más fría y estrechando la zona de polvo y gas que rodea a la estrella. Pasadas unas decenas de miles de años, se habrá barrido suficiente polvo como para que éste no pueda obscurecer ya la región H II. En dicha etapa, la región H II sigue emitiendo ondas de radio y radiación infrarroja, aunque menos intensamente, y el hidrógeno ionizado se hace visible. La región H II más familiar que en esa etapa se hace visible desde el sistema solar es la Gran Nebulosa de Orión.

Con el paso del tiempo, la región H II seguirá expandiéndose, siempre empujando la nube molecular. La intensidad de las radioemisión y de la emisión infrarroja irá decayendo a medida que pierda densidad el gas ionizado. En esa etapa observaremos una región H II,




**ESPESA NUBE MOLECULAR, asociada con M17, en este negativo de una región de Sagitario, tomado con el telescopio Schmidt de 48 pulgadas de Monte Palomar. La propia M17, que es un emplazamiento actual de nacimiento de estrellas de gran masa, es la región negra al extremo de la esquina superior izquierda. Las curvas de nivel que zigzaguean a través de la fotografía yendo hacia abajo y hacia la derecha trazan los perfiles de la nube molecular según la emisión detectada a partir del monóxido de carbono y han sido determinadas por Bruce G. Elmegreen, Charles J. Lada y Dale F. Dickinson, con el radiotelescopio de ondas milimétricas del McDonald Observatory, de Texas. Los números de cada curva de nivel indican la temperatura, en grados Kelvin, del monóxido de carbono. (Las curvas de nivel discontinuas indican regiones en las que el trazado era menos completo.) Hay menos estrellas visibles en la zona de la nube, debido a que el polvo de ésta bloquea la luz de algunas de las estrellas de fondo. Esta nube en particular está a 2500 parsecs y tiene una longitud de 170 (un parsec equivale a 3,26 años luz). Las ilustraciones que aparecen en las tres páginas siguientes muestran con mayor detalle la ubicación del nacimiento de estrellas.**

amplia y desplegada, que emite débilmente radiondas y ha dejado de emitir por completo radiación infrarroja.

Al final, la región H II revienta en el medio interestelar, dispersando la nube molecular. La estrella de gran masa queda desnuda en el espacio y el proceso de su nacimiento está completo. En ese estadio, el material "placentario" revelador ha sido expulsado. El proceso, en su conjunto, ha durado sólo unos cuantos millones de años.

En este esbozo teórico del nacimiento de una estrella de gran masa he dejado de lado dos puntos críticos. Se refiere el primero a la observación de que muchas de las estrellas Tipo O y Tipo B de la galaxia se encuentran en agrupaciones, poco densas, de unos cuantos centenares de estrellas, conocidas por asociaciones OB, y de que muchas regiones H II no contienen una estrella aislada sino un pequeño cúmulo de estrellas de Tipo O y de Tipo B. Tales observaciones implican que las extrellas de gran masa no se forman con frecuencia solas sino en grupos. El segundo punto que he ignorado es un rompecabezas teórico: ¿qué proceso es el que desencadena la inestabilidad gravitatoria que se necesita para la formación de estrellas de gran masa?

Recientemente, Bruce G. Elmegreen y Charles J. Lada, del Centro de Astrofísica del Observatorio de Harvard y del Observatorio Astrofísico Smithsoniano, han propuesto un modelo teórico para la formación de estrellas de gran masa, modelo que pone en relación ambos puntos. Se basa éste en una observación hecha hace algunos años por Adriaan Blaauw, de la Universidad de Leiden. Blaauw descubrió que las asociaciones OB se componían de subgrupos separados de estrellas: cada grupo constaba de cuatro a 20 estrellas y variaba, en extensión, de los dos a 200 parsecs. Los subgrupos de una misma asociación OB parecían estar alineados en una secuencia evolutiva: el subgrupo más antiguo y más disperso se encontraba en un borde de la asociación y el más joven y más compacto en el otro. Ese alineamiento secuencial de subgrupos indicaba que la nube primordial, a partir de la cual se había formado la asociación OB, había sufrido erupciones sucesivas de formación de estrellas. En cada erupción había nacido un subgrupo de ellas.

¿Cómo es que los subgrupos de una asociación OB están dispuestos en una secuencia de edades? Elmegreen y Lada subrayan el hecho de que la región H II que se forma alrededor de estrellas de gran masa recién nacidas se expande y presiona en la nube molecular circundante, a una velocidad comprendida entre los cinco y los 10 kilómetros por segundo, que es lo bastante rápida para crear una onda de choque. A medida que la onda de choque se adentra en la nube molecular, va capturando material en una capa situada detrás de ella. Transcurridos unos millones de años, el material de la capa que se halla detrás del frente de choque alcanza una densidad suficiente para hacerse gravitatoriamente inestable. Se rompe en fragmentos, éstos colapsan y empieza la formación de un nuevo subgrupo de estrellas de gran masa. Las nuevas estrellas aumen-

tan de temperatura, ionizan el gas en torno a ellas y crean su propia región H II, la cual se expande para crear otra onda de choque: ésta, a su vez, se expande en la nube molecular.

Al cabo de unos cuantos millones de años, la capa de material acumulada detrás de la nueva onda de choque forma otro subgrupo de estrellas: y el proceso se repite así a lo largo de la nube molecular. A través de una reacción en cadena de autodestrucción, la nube molecular, fragmento a fragmento y de erupción en erupción, da lugar a subgrupos de estrellas de gran masa en una cadena secuencial, y el nacimiento de éstos rompe y disipa la nube. La evolución cósmica exige la muerte de la nube para dar vida a las nuevas estrellas.

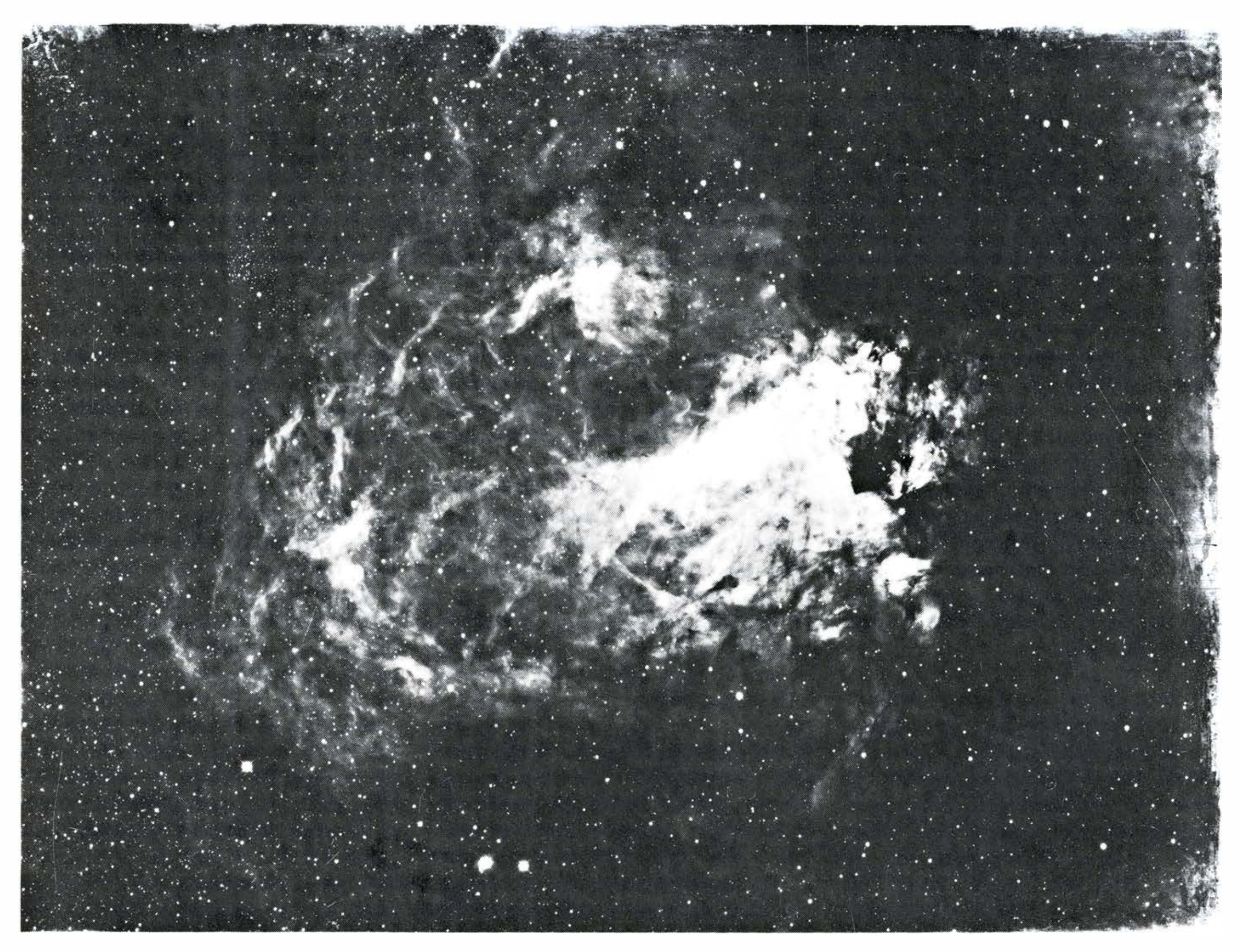
¿Existen observaciones que apoyen el modelo según el cual las estrellas de gran masa se forman, en secuencias gobernadas por choques, a partir de nubes, moleculares gigantes? En mi opinión sí las hay. De hecho, fueron observaciones recientes, en radio y en el infrarrojo, las que llevaron a Bruce G. Elmegreen y a Lada a dar un nuevo enfoque a la formación de asociaciones OB.

Me centraré en las pruebas de observación en dos regiones H II, a saber: M17 (la Nebulosa Omega de Sagitario) y W3 (Westerhout 3, el tercer objeto de un antiguo catálogo de radiofuentes compilado en la década de 1950 por Gart Westerhout, de la Universidad de Maryland). En ambas regiones, los jalones de la formación de estrellas se alinean siguiendo una clara configuración a través de nuestra visual.

M17 es una brillante y muy hermosa región H II, que se distingue fácilmente con un pequeño telescopio. El apelativo de Nebulosa Omega le viene de que, vista a través de un instrumento telescópico pequeño, tiene la forma de la letra griega omega mayúscula (Ω). Fotografías de gran apertura angular, hechas con telescopios también grandes, ponen de manifiesto que, hacia el este, la parte más brillante de la nebulosa parece terminarse abruptamente.

Con un radiotelescopio se observa que M17 emite una fuerte radiación centimétrica. La cantidad de radioemisión es la que cabría esperar de un subgrupo de unas 10 estrellas de gran masa. Curiosamente, el pico de la radiación no coincide con la parte visible más brillante de M17, sino que cae un tanto hacia el oeste de la misma, en el borde afilado de la nebulosa visible. Por tanto, la posición del pico de la emisión de radiación centimétrica indica que algunas estrellas del Tipo O y del Tipo B deben estar ocultas por el polvo.

Con telescopios que trabajan en longitudes de onda milimétricas, Lada y sus colegas han descubierto dos fragmentos densos de una nube molecular situados justo al oeste de la parte más brillante de la región H II. De hecho, la región H II



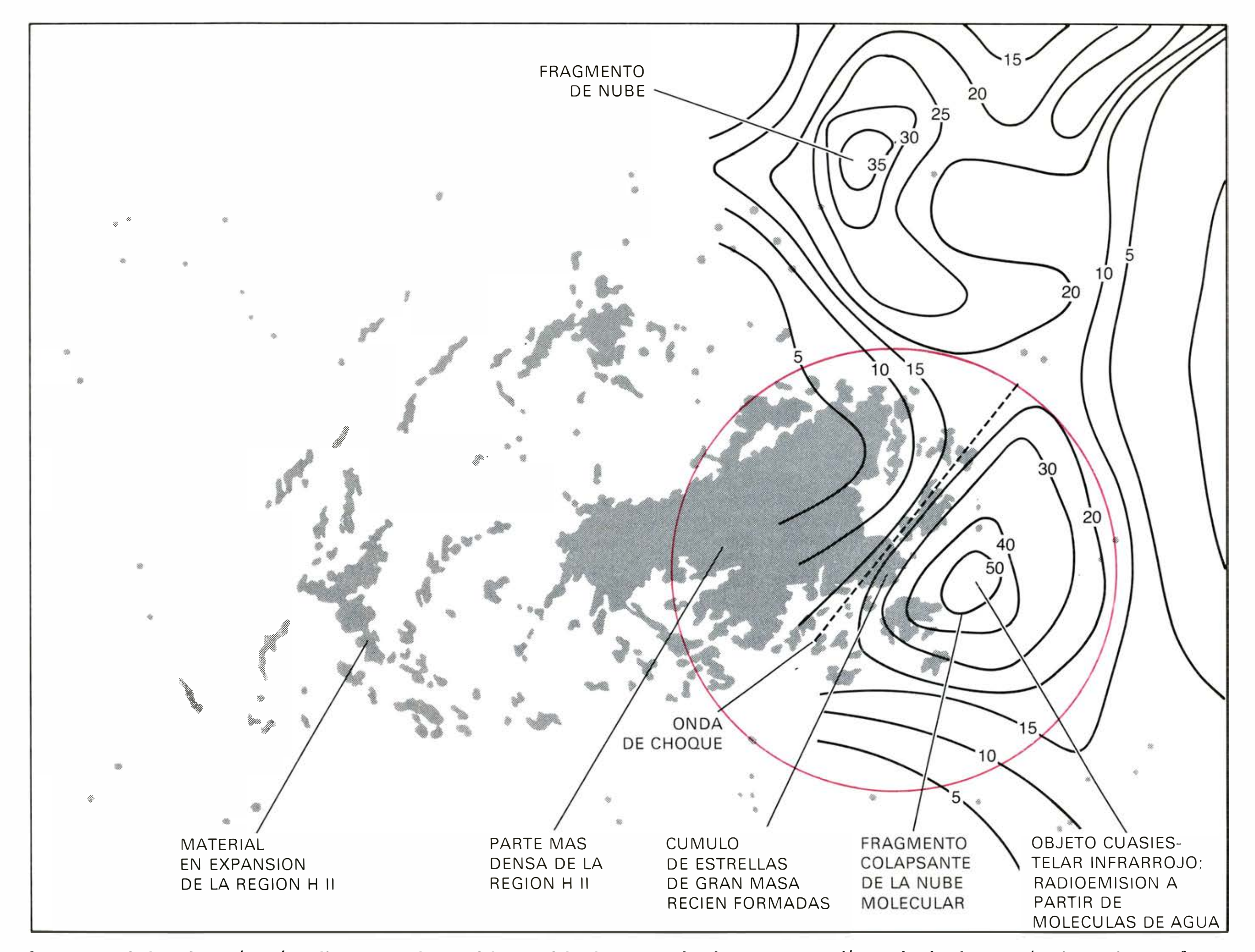
**LUGAR DE NACIMIENTO DE ESTRELLAS DE GRAN MASA en M17, en una fotografía en blanco y negro *(izquierda)* y en un mapa adjunto *(derecha)*. En el extremo izquierdo, la parte más antigua de la región H II visible se está expandiendo en el medio interestelar general. A la derecha, la región H II parece terminar bruscamente. Las radiocurvas de nivel del mapa indican, sin embargo, que la frontera es en realidad el comienzo de la gran nube molecular que mostrábamos en la página anterior. Una onda de choque procedente de la región H II empuja dentro de la nube. Aquí también, los números de las curvas de nivel indican la temperatura del monóxido de carbono en grados Kelvin. Dos**

parece estar presionando sobre esas nubes. Si el modelo de formación estelar secuencial es aplicable, las estrellas de gran masa deben estar formándose en la zona situada entre la región H II y la nube molecular suroeste.

Pero, ¿es este el caso? M. Beetz, del Instituto Max Planck de Astronomía, y sus colegas han fotografiado esa región de M17 con placas especiales, sensibles a la radiación infrarroja. Encuentran un cúmulo de por lo menos seis estrellas de Tipo O y Tipo B en la zona de transición entre la región H II y la nube molecular suroeste. Además, dicha zona está situada exactamente en el lugar donde la radioemisión centimétrica es más fuerte. Allí deben estar las estrellas de Tipo O y de Tipo B, ocultas a nuestra vista por el polvo, pero suministrando los fotones ultravioleta que ionizan el gas y generan la radioemisión.

Hay unos cuantos indicadores más que corroboran la formación estelar reciente. Douglas E. Kleinmann, del Centro de Astrofísica, y Edward L. Wright, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, han encontrado una fuente intensa, de tipo estelar, de emisión a 20 micras, en el centro de la nube molecular suroeste, junto a las dos posiciones de emisión intensa a partir de moléculas de agua. Ambas fuentes de emisión son inmediatas a la región de M17 que emite las ondas de radio centimétricas. Elmegreen y Lada han descubierto también una nube molecular gigantesca que se extiende hasta muy lejos, hacia el suroeste de M17. Las dos nubes moleculares, inmediatas a M17, parecen ser dos pequeños fragmentos de la nube mayor, cuyo tamaño se ha calculado en 22 por 86 parsecs y una masa que alcanza un millón de veces la del Sol. Recientemente, Elmegreen, Lada y Dale F. Dickinson han generalizado esas observaciones y han encontrado que la nube molecular gigante se extiende sobre un total de 44 por 170 parsecs.

Un alineamiento evolutivo se extiende desde el lado oriental de la nebulosa (el más antiguo) hasta el lado occidental (el más joven), a lo ancho de nuestra visual. La secuencia observada es la siguiente: primero, una región H II visible en la cual están englobadas las estrellas de tipo O y de Tipo B; segundo, una fuente de radioemisión centimétrica y de radiación infrarroja que rodea a un pequeño cúmulo de estrellas de Tipo O y de Tipo B; tercero, dos fragmentos densos de una nube molecular, uno de los cuales parece estar formando estrellas; cuarto, una nube molecular espesa, resquebrajada, que consta de muchos fragmentos. Esta secuencia observada de fenómenos encaja bien en el modelo de formación estelar secuencial. Estamos viendo una onda de choque, generada por una región H II, en expansión, irrumpiendo en una nube




**fragmentos de la nube están más calientes que el resto del gas y del polvo. Además, el más meridional presenta emisión a partir de moléculas de agua e hidroxilo y, en medio de ella, hay una fuente infrarroja masiestelar intensa, detectada por Kleinmann, del Centro de Astrofísica, y Wright, del MIT. Es probable que el fragmento meridional de la nube molecular sea una región en donde el gas esté colapsando para formar nuevas estrellas. Observaciones infrarrojas entre la región H II y la porción que colapsa de la nube molecular indican que en las profundidades del gas y del polvo hay un cúmulo de estrellas de gran masa muy jóvenes. La circunferencia de color marca la zona que contiene las estrellas.**

molecular y promoviendo la formación de estrellas de gran masa. Al este de la onda de choque quedan trozos de la nube molecular que formaron estrellas hace millones de años; al oeste de dicha onda queda otra parte de la nube molecular, en espera de una eventual autodestrucción.

M17 no es el único lugar del cielo donde podemos ver la secuencia. En la constelación Casiopea hay dos grandes regiones H II designadas con los símbolos IC 1795 e IC 1805. Ambas emiten radioondas centimétricas y sus radiocontrapartidas respectivas reciben la denotación W3 y W4. En fotografías a longitudes de onda visibles, W4, que queda al este de W3, es la más extensa y difusa de las dos regiones H II. Esta observación indica que W4 debe ser la región de H II más vieja. Cerca del centro de W4 hay un cúmulo de, por lo menos, 20 estrellas Tipo O y Tipo B. Las radioobservaciones de W4 indican que pocas o ninguna de las estrellas Tipo O y Tipo B están todavía ocultas por el polvo.

W3 resulta ser más compacta que W4; por consiguiente debe ser también la más joven de las dos regiones. Radioobservaciones de W3 muestran que está situada en el borde oeste de la región visible H II de IC 1795. Además, W3 consta en realidad de un cierto número de radiocomponentes compactas. La mayor de ellas se la ha designado por W3 A. Una de las componentes menores y más débiles coincide con una fuente de radiación de moléculas de hidroxilo, lo que explica su simbolización por W3 OH.

C. G. Wynn-Williams, Eric E. Becklin y Gerry Neugebauer, del Instituto de Tecnología de California, han examinado la región W3 con el telescopio Hale de 5 metros de Monte Palomar. Han encontrado que todas las componentes radio están emitiendo radiación infrarroja cercana y que la radiación es particularmente intensa a partir de W3 A y de W3 OH. Para completar esas observaciones, Kleinmann, Wright, Giovanni G. Fazio, Robert W. Noyes, Frank Low y yo mismo escrutamos la región W3 en longitudes de onda del infrarrojo lejano, con el telescopio de un metro, montado en un globo, del Centro de Astrofísica y de la Universidad de Arizona. Hemos podido descubrir que W3 A y W3 OH constituyen asimismo las fuentes más intensas de radiación infrarroja lejana.

¿Qué significan todas esas observaciones? En términos muy generales, resulta que W3 es una región que está formando activamente estrellas de gran masa y que algunas de las estrellas parecen haberse originado hace muy poco. Cada uno de los objetos radio e infrarrojos específicos es, probablemente, una estrella de gran masa o estrellas en un estadio evolutivo distinto. De acuerdo con las pruebas disponibles, W3 OH es la fuente más joven de W3: se trata a buen seguro de una estrella de gran masa que acaba de nacer, pero no se ha instalado todavía en la vida normal. Todas sus radioemisiones y emisiones infrarrojas provienen de un volumen que supera sólo en unos centenares de veces el sistema solar.

Procediendo como si retrocediéramos a partir de ese encuadre ajustado de W3, vemos que ésta forma parte de un complejo que comprende la radiofuente W4 y las dos regiones H II: IC 1795 e IC 1805. Justo al oeste del complejo, según las observaciones efectuadas por Lada, Elmegreen y William DeCampli, del Centro de Astrofísica, y por Patrick Thaddeus y Hong-Ih Cong, del Instituto de Estudios Espaciales de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA), hay una nube molecular de una extensión de unos 50 parsecs. Esta nube presenta tres puntos calientes de emisión a partir de moléculas de monóxido de carbono. La septentrional está junto a W3 A; la de en medio está asociada con W3 OH; y la meridional es una fuente tanto de radiación infrarroja lejana como de emisión de ondas de radio centimétricas. La naturaleza de esta última fuente no está clara; quizá sea más joven que W3 OH.

Como M17, el complejo W3/W4 es un caso típico de la formación en secuencia de estrellas de gran masa a partir de nubes moleculares: nacimiento estelar desencadenado por ondas de choque. De este a oeste, a lo ancho del complejo, vemos mezclarse las áreas más antiguas con las más jóvenes. Primero, situada más hacia el este se encuentra IC 1805 (asociada con W4), una región H II envejecida que pronto se disipará en el espacio interestelar, dejando tras de sí un cúmulo desligado de estrellas Tipo O y Tipo B. En segundo lugar,

**ESTRELLAS RECIEN NACIDAS en las profundidades del núcleo de M17. Esta fotografía ha sido tomada en la longitud de onda del infrarrojo de 9200 angstroms por M. Beetz, y sus colegas, trabajando con el telescopio de 123 centímetros del Centro Astronómico Hispano-Alemán de Almería, en Calar Alto, España. Los objetos incluidos dentro de la porción de nebulosidad limitada por la elipse resultan ser estrellas de gran masa, de una edad que puede ser sólo unas cuantas decenas de miles de años. Al suroeste del cúmulo está la fuente infrarroja masiestelar, descubierta por Kleinmann y Wright *(flecha)* en el fragmento meridional de la nube molecular. La fotografía es circular debido a que el telescopio está dotado de un campo visual también circular, muy pequeño.**

viene la región H II más joven IC 1795, la cual se está expandiendo sobre la gran nube molecular sita hacia el oeste. Tercero, en la frontera de IC 1795 con la nube molecular, hay una tira de regiones H II compactas y de fuentes infrarrojas también compactas. Cuarto, y hacia el extremo oeste, está la propia nube molecular, la cual morirá en unas cuantas decenas de millones de años, al ir "procreando" nuevas estrellas.

He presentado dos de los mejores ejemplos que prueban la formación gobernada por choques de estrellas de gran masa a partir de nubes moleculares. No debe pensarse que todas las observaciones que se han hecho a longitudes de onda milimétricas e infrarrojas encajan en el esquema. Las que lo hacen, empero, me convencen de que el modelo es bueno. Se trata de un concepto sencillo y esa simplicidad es atractiva.

Una vez iniciada la formación de estrellas de gran masa, éstas consumen el material de las nubes moleculares y disipan el que no acaba como estrellas. Pero, ¿qué es lo que desencadena la formación de las estrellas? ¿Qué proceso introduce la inestabilidad gravitatoria inicial? Las pruebas a partir de las observaciones efectuadas hasta la fecha manifiestan que la mayoría de las nubes moleculares no son, por sí mismas, gravitatoriamente inestables. Alguna fuerza exterior debe perturbarlas. Pero, ¿cuál?

Cabe la posibilidad de que la nube molecular se vea perturbada por una onda de choque procedente de la explosión de una supernova. Cuando muere una estrella de gran masa, ésta arroja material a alta velocidad hacia el medio interestelar y crea una onda de choque que, al seguir propagándose, puede durar cerca de un millón de años. Si tales ondas de choque llevan nubes moleculares a una inestabilidad gravitatoria inicial, se tendría que la muerte de una estrella de gran masa de una generación estaría conectada directamente con el nacimiento de estrellas de gran masa de la generación siguiente.

Una segunda posibilidad es que dos nubes moleculares lleguen a chocar. Lyman Spitzer, de la Universidad de Princeton, ha calculado, sin embargo, que la presencia de tales colisiones sería baja, menos de una colisión en toda la galaxia cada 10 millones de años.

Una tercera posibilidad es que una nube molecular pueda ser perturbada por una onda de choque a partir de las ondas espirales de densidad de la galaxia. Para explicar la estructura espiral de nuestra galaxia, algunos teóricos postulan la existencia de dos ondas espirales de densidad, ondas sonoras, que se desplazan a través del disco en el que están situados los brazos espirales de la galaxia. Cuando las ondas de densidad surcan el medio interestelar, apilan material y crean ondas de choque, las cuales desencadenan la formación de estrellas. Por ahora, ninguna de esas tres posibilidades presenta una clara ventaja.

He descrito posibles procesos para el nacimiento de estrellas de gran masa. ¿Qué sucede con el nacimiento de estrellas menores, como el Sol, las cuales son mucho más corrientes en nuestra galaxia? Creo que tales estrellas se forman también por inestabilidad gravitatoria, pero que dicha inestabilidad se promueve de otra manera. El proceso exacto no está claro todavía. Tal vez estrellas como el Sol se desarrollan a partir de los "glóbulos" de material frío que pueden verse en algunas regiones H II y también por sí solos en el espacio interestelar. Las radioobservaciones apuntan en el sentido de que algunos de esos glóbulos, por lo menos, están contrayéndose (véase "Los Glóbulos de Bok", por Robert L. Dickman; INVESTIGACION Y CIENCIA, agosto de 1977). Los glóbulos quizá sean residuos de una gran nube molecular y disipada, o tal vez nubes interestelares pequeñas que nunca capturaron bastante material como para crecer y convertirse en las grandes nubes moleculares donde nacen las estrellas de gran masa. El cómo se forman estrellas del tipo del Sol sigue siendo uno de los problemas más mortificantes de la astrofísica contemporánea.

Queda, por último, la cuestión fundamental: ¿Cómo es que lo que primero se forma sean las nubes moleculares gigantes? No se podrá explicar cómo nacen las estrellas hasta que no se sepa cómo se crean sus lugares de nacimiento.

El modelo regido por choques para la formación de estrellas de gran masa a partir de nubes moleculares gigantes que he presentado aquí constituye una buena muestra de cómo los avances tecnológicos pueden promover descubrimientos y teorías. Hace trece años, Blaauw sugirió que las estrellas de gran masa se forman en secuencias de subgrupos. No podía, sin embargo, escudriñar los lugares de nacimiento celestes para ver estrellas en formación, pues carecía de los instrumentos que le permitieran observar a longitudes de onda milimétricas o en el infrarrojo. Hoy en día disponemos de herramientas que han ampliado nuestra visión y han ayudado a aguzar nuestra percepción del gran esquema de la evolución cósmica.

# Cómo compartían su alimento los homínidos protohumanos

*Excavaciones realizadas en yacimientos de dos millones de años de antigüedad, sitos en Africa oriental, revelan que los primitivos homínidos de postura erecta fabricaban utensilios y acarreaban los alimentos hasta su lugar de residencia*

Glynn Isaac

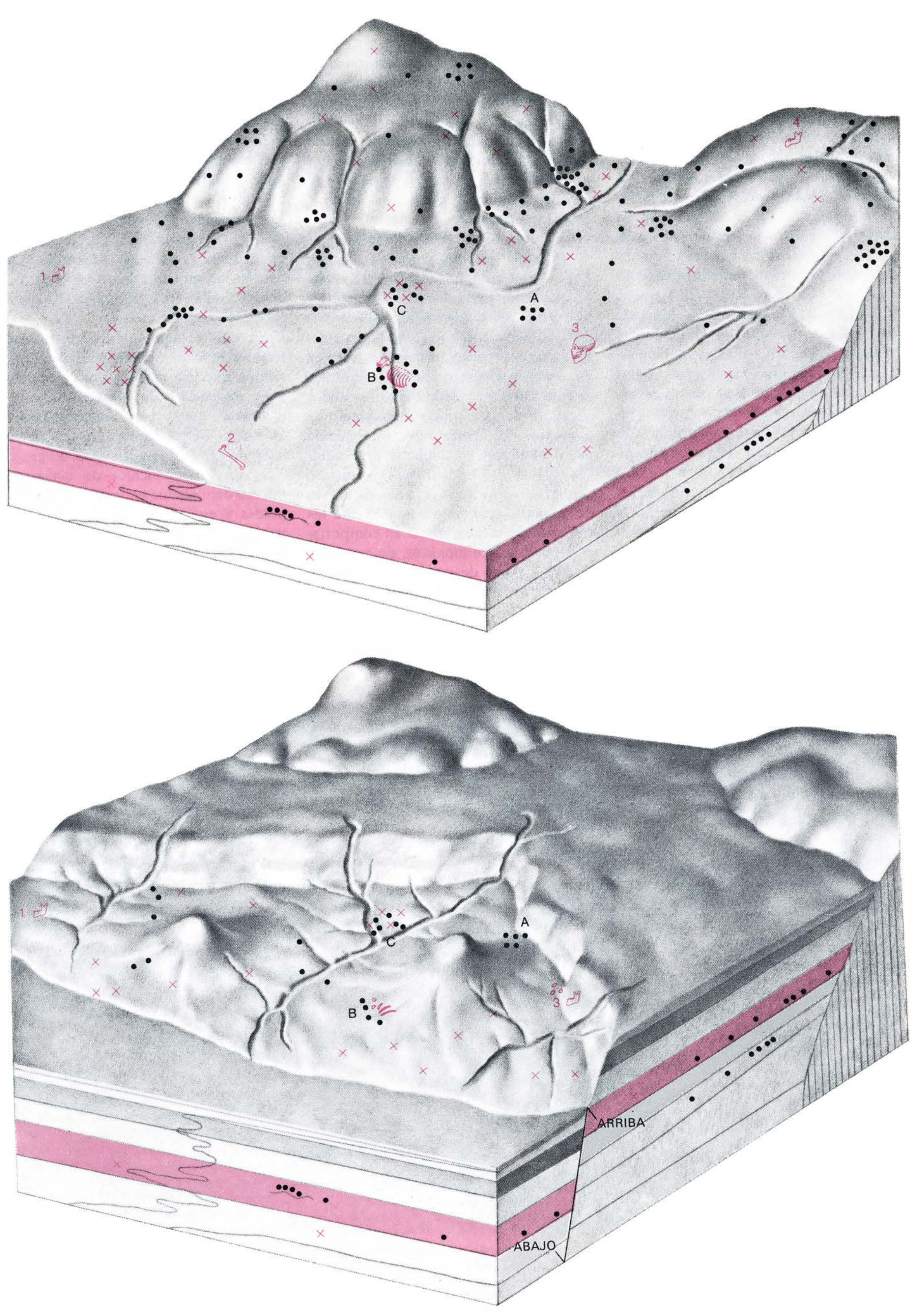
A lo largo de la última década los investigadores del hombre fósil han ido descubriendo, en Africa oriental, restos de muchos protohombres primitivos. Los hallazgos en Olduvai, Laetolil, Koobi Fora, el valle de Omo y Hadar, por citar sólo algunas localidades principales, demuestran claramente que hace de dos a tres millones de años varios homínidos bípedos, de forma esencialmente humana, vivían en esta región de Africa. Los paleontólogos que han exhumado los fósiles indican que éstos difieren del hombre actual, sobre todo, por ser pequeños, por tener mandíbulas y dientes relativamente grandes y por poseer un cerebro que, aunque mayor que el de los monos de tamaño corporal equiparable, raramente tiene un volumen superior a la mitad del encéfalo del hombre moderno.

Los descubrimientos africanos conllevan muchas implicaciones para el estudioso de la evolución humana. Por ejemplo, podemos imaginar hasta qué punto los homínidos avanzados de hace dos millones de años poseían un comportamiento "humano". ¿Qué aptitudes especiales compartían con el hombre moderno? ¿Qué presiones de la selección natural, en el tiempo en el que vivieron, condujeron a la complicación evolutiva de la mente y de la cultura humanas? Estas preguntas les resultan difíciles de responder a los paleontólogos porque las pruebas que se relacionan con ellas no son anatómicas. Los arqueólogos, por su experiencia en el estudio de pautas de comportamiento prehistórico en general, pueden ayudar a dar con las respuestas.

Desde hace tiempo se sabe que la especie humana difiere de sus más próximos parientes primates vivos mucho más por divergencias en el comportamiento que por divergencias en la anatomía. Paradójicamente, sin embargo, el estudio tradicional de la evolución humana estuvo dominado por investigaciones basadas en el esqueleto y en la anatomía comparada de los primates fósiles. Pero en los últimos años se ha empezado a ampliar el objetivo del estudio evolutivo directo merced a nuevas líneas de investigación. Una de tales líneas supone investigaciones del comportamiento y de la ecología de los primates y de otros mamíferos vivos. Los resultados de estas observaciones pueden compararse actualmente con los datos cuantitativos procedentes de otra nueva área de estudio, la ecología cultural de aquellas sociedades humanas que subsisten sin cultivar plantas ni criar animales: los pocos cazadores-recolectores que sobreviven hoy día. Otra nueva e importante línea de investigación supone el estudio directo de las circunstancias ecológicas que constituyeron el entorno del despliegue evolutivo del hombre. Tales investigaciones han sido posibles porque las rocas sedimentarias estratificadas de Africa oriental preservan, además de restos fósiles de homínidos, un cúmulo valiosísimo de datos: un registro coherente y ordenado de los ambientes habitados por estos protohombres.

La tarea del arqueólogo al trazar inferencias a partir de tales datos resulta posible por el hecho de que, en un determinado estadio de su evolución, los antepasados del hombre moderno se convirtieron en fabricantes y usuarios de pertrechos. Entre otras cosas, dieron forma, usaron y desecharon numerosos útiles de piedra. Estos artefactos virtualmente indestructibles forman una especie de registro fósil de aspectos del comportamiento, registro que es complementario del anatómico que proporcionan los huesos fósiles de los propios fabricantes de herramientas. Los estudiosos de la Edad de Piedra Antigua se dedicaron casi exclusivamente a lo que podía aprenderse a partir de la forma de tales utensilios. Hoy día, la investigación arqueológica hace cada vez más hincapié en el contexto de los artefactos; por ejemplo, el modelo de distribución de los utensilios desechados en distintos asentamientos y la asociación de estos utensilios con varios tipos de restos de alimentos. El estudio del contexto de los artefactos de la primitiva Africa proporciona indicios únicos tanto sobre las circunstancias ecológicas de los fabricantes protohumanos de herramientas

**PAISAJES DE AYER Y DE HOY en la región del valle del Rift en Africa oriental, indicados esquemáticamente en la página opuesta, que resumen la actividad geológica que primero preservó y luego expuso a la luz testimonios de vida protohumana. Hace dos millones de años *(arriba)* sobre las colinas y una llanura de inundación *(primer término)* adyacente a un lago del valle del Rift se encontraban distribuidos huesos de homínidos *(1-4, color)* y de otros animales *(x, color)*. Había también, esparcidos por la superficie, útiles de piedra *(puntos negros)*, fabricados, empleados y desechados por los protohombres. Con el tiempo, capas de sedimentos fueron cubriendo los huesos y los utensilios que se encontraban en la llanura de inundación; el enterramiento los preservó, mientras que los huesos y utensilios de las colinas fueron arrastrados finalmente por las aguas. Hoy día *(abajo)*, después de que una falla elevara un bloque de sedimentos, la erosión está exhumando algunos de los huesos y de los acúmulos de utensilios que permanecieron mucho tiempo enterrados, incluyendo los tres tipos de yacimientos que se indican en la superficie del diagrama de arriba (*A-C*). Los yacimientos de tipo A contienen acúmulos de utensilios de piedra junto con las rocas matriz desbastadas, abandonadas, que proporcionaron la materia prima para los útiles y las lascas de desecho procedentes del proceso de fabricación; hay muy pocos huesos o ninguno en absoluto. Los yacimientos de tipo B contienen acúmulos similares de utensilios en asociación con huesos de un único animal grande. Los yacimientos de tipo C contienen acúmulos similares de herramientas, pero los huesos proceden de varias especies de animales. (Ilustraciones de L. M. Raboni.).**


1
A
C
B
3
2
4
1
A
C
B
3
ARRIBA
ABAJO

como sobre aspectos de su organización socioeconómica.

## Comparando hombres y monos

¿Cuáles son las pautas de comportamiento que separaron a la especie *Homo sapiens* de sus parientes primates vivos más cercanos? No es difícil realizar una lista de tales diferencias comparando el comportamiento del hombre y el del mono y centrando la atención no en las muchas características que ambos tienen en común, sino en sus características contrapuestas. En la relación que sigue he utilizado recientes estudios de campo de los grandes antropoides (en particular del chimpancé, *Pan troglodytes*) y estudios similares sobre la organización de sociedades actuales de cazadores-recolectores. La lista tiende a resaltar los contrastes relacionados con la adaptación primaria de subsistencia, es decir, la búsqueda del alimento.

En primer lugar, *Homo sapiens* es un primate bípedo que cuando se desplaza de un lugar a otro suele acarrear herramientas, alimento y otras posesiones, ya sea en sus brazos o en recipientes. Esto no ocurre en los grandes monos, ni en cuanto a la postura ni en cuanto a las posesiones.

En segundo lugar, los miembros de las sociedades de *Homo sapiens* se comunican mediante lenguaje hablado; la comunicación verbal sirve para intercambiar información sobre el pasado y el futuro y, también, para la regulación de muchos aspectos de las relaciones sociales. Los monos, aunque se comunican entre sí, carecen de lenguaje.

En tercer lugar, en las sociedades de *Homo sapiens* la adquisición de alimento es una responsabilidad corporativa, por lo menos en parte. Entre los miembros de las agrupaciones sociales humanas de distinto tamaño el compartir activamente el alimento es una forma característica de comportamiento; por lo general, los grupos familiares constituyen los nodos cruciales de una red de intercambio de alimento. El alimento se intercambia entre adultos, y se comparte entre adultos y jóvenes. El único comportamiento similar observado en los grandes monos se advierte cuando ocasionalmente los chimpancés comen carne. El comportamiento de los chimpancés, sin embargo, está muy lejos de un compartir activo; sugiero que podría denominársele más adecuadamente gorroneo tolerado. Los alimentos vegetales, que constituyen la dieta principal de los grandes monos, no se comparten y, casi invariablemente, son consumidos en el acto por cada individuo.

En cuarto lugar, en las agrupaciones sociales humanas existe siempre lo que podría llamarse un centro en el espacio, un "lugar de residencia", de modo que los individuos pueden desplazarse de manera independiente por el terreno circundante y volverse a reunir más tarde. No hay pruebas de un lugar de residencia similar en las agrupaciones sociales de los grandes monos.

En quinto lugar, los cazadores-recolectores humanos tienden a dedicar más tiempo que los demás primates actuales a la adquisición de alimentos ricos en proteínas, cazando o pescando presas animales. Debe señalarse que la distinción no es de categoría sino de grado. Las pruebas crecientes de comportamiento depredador en los grandes antropoides y en los monos sugieren que el principal contraste entre los seres humanos y los demás primates actuales, en lo que se refiere a la depredación, es que sólo el hombre se alimenta de modo ha-



**PAISAJE DESOLADO en la región árida de Koobi Fora, Kenia. Es típico de la clase de terreno erosionado en el que las cárcavas producidas por el agua exponen huesos y utensilios de piedra que se encontraban enterrados bajo sedimentos y ceniza volcánica desde hace más de un millón de años. La excavación que se está realizando *(centro)* saca a la luz los huesos de hipopótamo y los acúmulos de artefactos que fueron en parte denudados por la erosión reciente y que halló R. Leakey en 1969. El yacimiento es del tipo B (útiles y restos de un solo animal).**

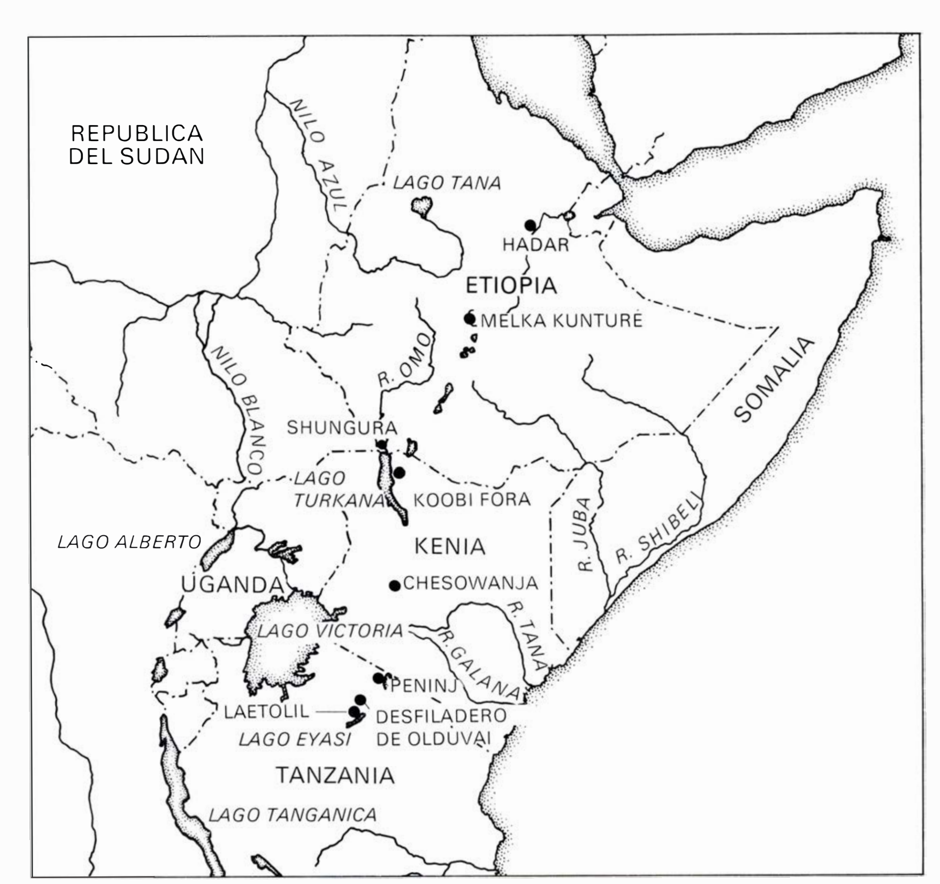
bitual de presas que sobrepasan los 15 kilogramos de peso.

Entre las actividades genuinas de los cazadores-recolectores humanos está la recogida de plantas comestibles y de pequeñas cantidades de alimento animal (lagartos, tortugas, ranas, polluelos y huevos, por ejemplo). De modo característico, una determinada proporción de este alimento no es consumida hasta el regreso al lugar de residencia. Dicho comportamiento presenta un notable contraste con el que se observa entre los grandes monos cuando buscan alimento, que de manera casi invariable comen en el lugar en el que aquél se obtiene.

Otra diferencia más con el comportamiento alimentario de los grandes monos es la práctica de los cazadores-recolectores humanos de someter a muchos productos alimenticios a una preparación previa a su consumo. Tal manipulación incluye aplastar, moler, cortar y calentar el alimento, prácticas éstas que no se observan entre los grandes monos.

Los cazadores-recolectores humanos utilizan asimismo varios tipos de pertrechos en la búsqueda del alimento. La sociedad humana que poseía quizá los pertrechos más simples nunca observados era la sociedad aborigen de Tasmania, una población de cazadores-recolectores que fue exterminada en el siglo XIX. El inventario de los pertrechos de los tasmanios incluía mazas, espadas y palos cavadores de madera, utensilios cortantes hechos de piedra trabajada que se utilizaban para dar forma a los objetos de madera, y gran diversidad de recipientes: artesas, cestos y bolsas. Los tasmanios conocían también el fuego. Aunque tales pertrechos son elementales para nuestro criterio, resultan muchísimo más complejos que los tipos de útiles rudimentarios que los actuales chimpancés pueden obtener y utilizar en la naturaleza, es decir, ramitas y tallos de gramíneas.

Además de esta larga lista de contrastes del comportamiento relacionado con la subsistencia entre los cazadores-recolectores humanos y los primates actuales, existe todo un cúmulo de otras diferencias en lo que respecta a la organización social. Aunque estas importantes características adicionales caen con mucho fuera del marco de pruebas que se considerarán aquí, son vitales a la hora de definir las pautas del comportamiento humano. Entre ellas está la propensión hacia la formación de lazos de apareamiento de larga duración entre un macho y una o más hembras. Los lazos que llamamos "matrimoniales" suponen vínculos económicos recíprocos, responsabilidad conjunta en la cría de los niños y




**LOS PRINCIPALES YACIMIENTOS** en Africa oriental incluyen (de norte a sur) Hadar, Melka Kunturé y Shungura en Etiopía, el distrito de Koobi Fora al este del lago Turkana en Kenia, Chesowanja en Kenia y Peninj, el desfiladero de Olduvai y Laetolil en Tanzania. La edad de los acúmulos de útiles de piedra, algunos de ellos asociados con huesos animales, que han sido desenterrados en estos yacimientos, va desde hace un millón de años (estrato superior II de Olduvai) a 2,5 millones (estratos superiores de Hadar). Algunos yacimientos pueden tener una antigüedad mayor.

| AÑOS ANTES DEL PRESENTE (MILLONES) | OLDUVAI | KOOBI FORA | VALLE DE OMO | OTROS |
|---|---|---|---|---|
| 1.0 | ESTRATO SUPERIOR II | | | |
| 1.2 | ESTRATO MEDIO II | | | PENINJ MELKA KUNTURÉ CHESOWANJA |
| 1.4 | ESTRATO INFERIOR II | YACIMIENTOS DE KARARI | | |
| 1.6 | ESTRATO I | YBS, YHA | | |
| 1.8 | | | | |
| 2.0 | | | MIEMBRO F DE SHUNGURA | |
| 2.2 | | | MIEMBRO E DE SHUNGURA | |
| 2.4 | | ? | | ESTRATOS SUPERIORES DE HADAR |
| 2.6 | | | | |
| 2.8 | | | | |
| 3.0 | | | | |
| 3.2 | | | | ESTRATOS INFERIORES DE HADAR |
| 3.4 | | | | LAETOLIL |
| 3.6 | | | | |

**ANTIGUEDAD RELATIVA** de algunos yacimientos seleccionados de Africa oriental. Los estratos I y II del desfiladero de Olduvai tienen de 1,8 millones a un millón de años de edad. Los yacimientos de Shungura en el valle de Omo poseen más de dos millones de años de antigüedad. Dos localidades de Koobi Fora, el yacimiento hipopótamo/artefacto (YHA) y el yacimiento Kay Behrensmeyer (YKB), tienen por lo menos 1,6 millones de años de antigüedad. Los estudios geológicos de los yacimientos de Koobi Fora sugieren que pueden alcanzar los 2,5 millones de años (*línea de color*). En los estratos de Hadar y en Laetolil sólo se han hallado fósiles de homínidos.

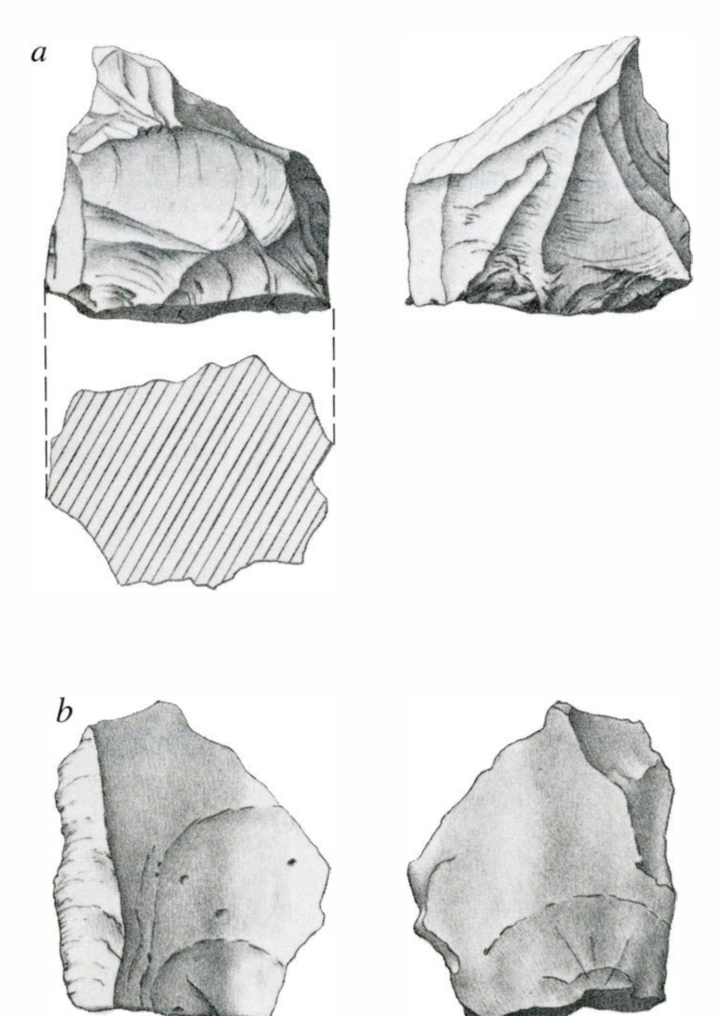
restricciones en el acceso sexual. Otro de tales contrastes sociales es evidente en la tendencia distintivamente humana a clasificar por categorías a los miembros compañeros de un grupo según el parentesco y metáforas de parentesco. Los seres humanos regulan muchas relaciones sociales, incluso el apareamiento, según normas complejas que implican categorías de parentesco. Quizás entre los grandes monos existen lazos familiares de algún tipo, pero no ocurre así con las categorías y reglas explícitas. Estas diferencias resultan más aparentes por la virtual ausencia en el comportamiento observado en los antropoides de las actividades distintivamente humanas que se califican, algo vagamente, de "simbólicas" y "rituales".

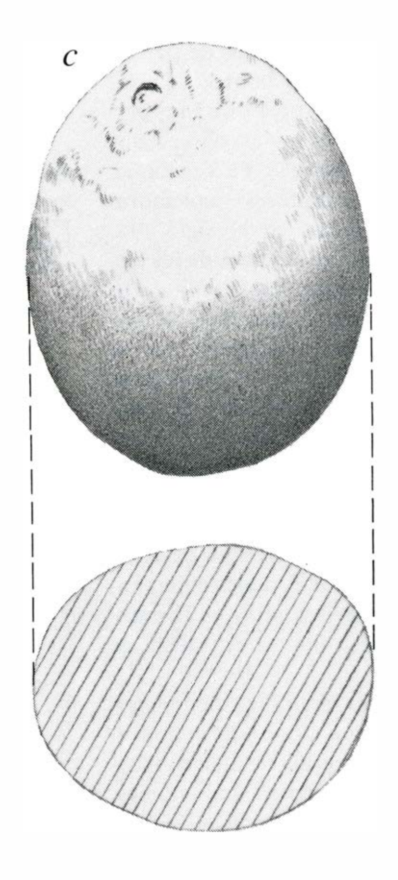
Enumerar los contrastes entre las estrategias de subsistencia no humana y humana supone inevitablemente simplificar al máximo. Como han demostrado modernos estudios de campo sobre distintos grandes monos y sobre seres humanos que, como los san (antaño mal llamados bosquimanos) del desierto de Kalahari, todavía subsisten sin agricultura, existe un grado de similitud mucho mayor entre las dos estrategias de subsistencia de lo que se había reconocido antes. Por ejemplo, en lo que se refiere a los repertorios de comportamiento relacionados con la comida de carne y la utilización de herramientas, las diferencias entre antropoide y hombre son de grado y no de clase. Algunos investigadores han llegado a recurrir a estos datos para negar la existencia de cualesquiera diferencias fundamentales entre las estrategias del hombre y las de los primates no humanos.

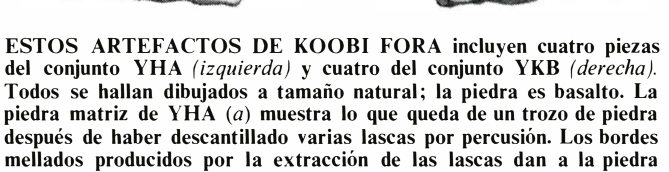
A mi entender existen diferencias significativas. Permítaseme citar las dos que me parecen más importantes. En primer lugar, en tanto que el hombre puede comer mientras recolecta, como hacen los monos, éstos no suelen posponer el consumo del alimento hasta su retorno a un lugar de residencia, como hace el hombre. En segundo lugar, los seres humanos comparten activamente parte de la comida que adquieren; los monos no, aunque se ha observado que chimpancés del Parque Nacional de Gombe, en Tanzania, toleran el gorroneo cuando disponen de carne.

## Del homínido al hombre

Quien se disponga a examinar la cuestión de los orígenes del hombre se enfrentará con dos enigmas complementarios. El primero está relacionado con la divergencia evolutiva. ¿En qué momento la estirpe primate antepasada de los monos actuales se separó de la estirpe ancestral que condujo al hombre? ¿Cuáles fueron las circunstancias de la divergencia? ¿Sobre qué extensión geográfica tuvo lugar? Todavía no se ha establecido con absoluta certeza si esta divergencia



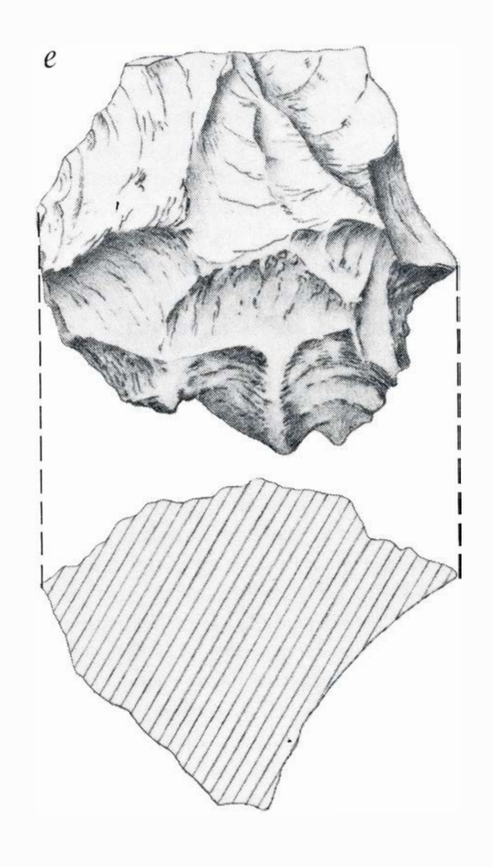

**ESTOS ARTEFACTOS DE KOOBI FORA incluyen cuatro piezas del conjunto YHA *(izquierda)* y cuatro del conjunto YKB *(derecha)*. Todos se hallan dibujados a tamaño natural; la piedra es basalto. La piedra matriz de YHA (*a*) muestra lo que queda de un trozo de piedra después de haber descantillado varias lascas por percusión. Los bordes mellados producidos por la extracción de las lascas dan a la piedra matriz una utilidad potencial como utensilio. Las lascas se desprendieron de la piedra matriz mediante golpes de un martillo de piedra como el que se muestra aquí (*c*). Los bordes agudos de las lascas, como la del ejemplo ilustrado (*b*), permiten utilizarlas como herramientas de corte. La minúscula lasca (*d*) es, con probabilidad, el producto accidental del proceso de percusión; la presencia de muchas esquirlas de piedra como**

ocurrió hace sólo de cinco a seis millones de años, como Vincent M. Sarich, de la Universidad de California en Berkeley, y otros argumentan apoyados en pruebas bioquímicas, o si hace de 15 a 20 millones de años, como creen muchos paleontólogos esgrimiendo pruebas fósiles. Por lo menos hay un punto claro. La divergencia tuvo lugar mucho antes del período en el que aparecen por primera vez los restos arqueológicos más antiguos descubiertos hasta el momento. La arqueología, por lo menos por ahora, no puede aportar ninguna contribución que dé pie a la solución del problema de la separación entre el antepasado del antropoide y el antepasado del hombre.

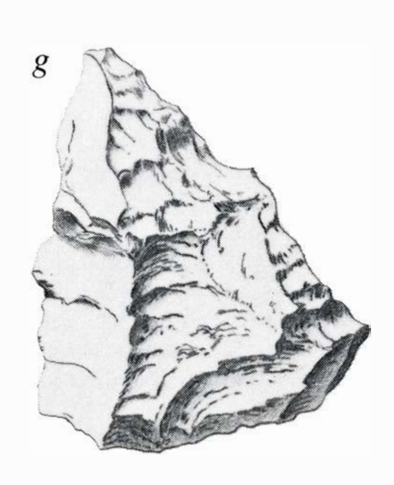
En lo que respecta al segundo enigma, las pruebas fósiles procedentes de Africa oriental muestran que la divergencia, no importa en qué momento tuviera lugar, dio origen hace de dos a tres millones de años a poblaciones de homínidos bípedos bastante pequeños. El problema reside en cómo identificar las pautas de la selección natural que transformó a estos protohombres en hombres. A la arqueología corresponde un gran papel en la dilucidación del segundo enigma. La excavación de yacimientos de estos protohombres ha revelado pruebas que sugieren que hace dos millones de años algunos elementos que hoy sirven para distinguir al hombre de los monos formaban parte ya de una nueva estrategia adaptativa. Hay pruebas de que un aspecto especialmente importante de esta estrategia era el compartir la comida.

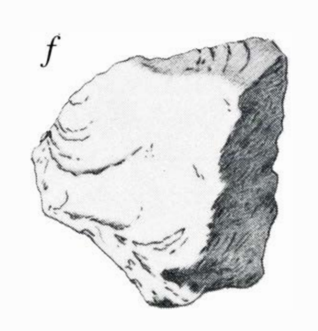
Los estudios arqueológicos que han inspirado la formulación de nuevas hipótesis sobre la evolución humana empezaron hace unos 20 años, cuando Mary Leakey y su marido Louis descubrieron en el desfiladero de Olduvai, en Tanzania, un cráneo fósil que él llamó *Zinjanthropus*. Las excavaciones que los Leakey emprendieron en aquel yacimiento mostraron no sólo que en los mismos estratos que contenían este y otros homínidos fósiles se encontraban utensilios de piedra, sino también que los artefactos desechados se hallaban asociados a numerosos huesos rotos de animales. Los Leakey llamaron a estas concentraciones de útiles y huesos "lugares de habitación". El trabajo en Olduvai ha continuado bajo la dirección de Mary Leakey, y, en 1971, se publicó una importante monografía que puso los resultados de Olduvai a disposición de estudios comparados.

Otras importantes oportunidades para investigaciones arqueológicas de este tipo han aparecido en el valle fallado de Gregory, en lugares como la región de Koobi Fora (antes Rodolfo oriental) en Kenia septentrional, en Shungara en el valle de Omo en Etiopía sudoccidental y en la región de Hadar en Etiopía oriental. Los cálculos actuales de la edad de estos yacimientos cubren un período de tiempo que va desde hace unos 3,2 mi-









**ésta en los grupos de utensilios de YHA indica que los útiles de piedra se hicieron en este lugar. Al mismo tiempo, la ausencia de piedra local no trabajada como materia prima potencial para los utensilios, sugiere que las piedras a desbastar fueron acarreadas a este lugar por los constructores de útiles. Los artefactos del segundo grupo incluyen también una piedra matriz (*e*) que tiene muchas lascas desprendidas por percusión y otra pequeña esquirla de piedra (*h*). Los bordes de las dos lascas (*f*, *g*) son suficientemente afilados para cortar carne, cuero, tendones o madera. Como en el yacimiento hipopótamo/artefacto (YHA), la ausencia de materia prima local para los útiles de piedra en el yacimiento Kay Behrensmeyer, que hemos simbolizado por YKB, sugiere que los constructores de herramientas transportaron hasta aquí trozos adecuados de lava.**

llones de años hasta hace unos 1,2 millones de años.

Desde 1970 he codirigido con Richard Leakey (el hijo de Mary y Louis Leakey) un equipo de trabajo en Koobi Fora, un distrito que incluye la orilla nororiental del lago Turkana (antes lago Rodolfo). Nuestra investigación sobre la geología, la paleontología y la paleoantropología de esa zona es deudora de la colaboración prestada por colegas del Museo Nacional de Kenia y de muchas otras partes del mundo. El trabajo, que empezó en 1968, ha sido subvencionado y alentado por el Gobierno de Kenia, la National Science Foundation y la National Geographic Society. Nuestras investigaciones han proporcionado datos arqueológicos que corroboran y completan las pruebas obtenidas anteriormente en el desfiladero de Olduvai. Los datos combinados han hecho posible ver de cuánta utilidad resulta la arqueología a la hora de contestar los interrogantes que plantea la evolución humana.

En Koobi Fora, como en todos los demás lugares de Africa oriental, los depósitos de sedimentos estratificados, que se acumularon hace mucho tiempo en las cuencas de los lagos del valle del Rift, están hoy sometidos a la erosión causada por los chubascos del desierto y por riachuelos efímeros. Al irse erosionando los lechos sedimentarios, van saliendo a la luz muestras de los artefactos antiguos y de los huesos fósiles que contienen. El material permanece expuesto cierto tiempo sobre el suelo, pero, finalmente, los huesos fósiles acaban por ser destruidos por las inclemencias del tiempo, o una tormenta arrastra lejos piedras y huesos a la vez.

Todo el reconocimiento de campo en Africa oriental funciona siguiendo líneas esencialmente similares. Los equipos de campo prospectan en terrenos erosionados a la búsqueda de fósiles y artefactos exhumados. En los lugares en los que aparece en superficie una concentración de huesos fósiles o indicios arqueológicos prometedores, la etapa siguiente es la excavación. Esta se realiza en parte para exhumar más ejemplares que todavía se hallan entre las capas de sedimentos y, en parte, para obtener información exacta sobre la localización estratigráfica original del material de superficie. Lo más importante es que la excavación permite a los investigadores trazar un mapa detallado de las localizaciones relativas del material que es desenterrado. Por ejemplo, si existen asociaciones entre huesos, o entre huesos y piedras, la excavación revela estas características del yacimiento.

## Tipos de yacimientos

Las trazas arqueológicas de vida protohumana exhumadas de esta manera pueden exhibir varias configuraciones distintas. En algunos estratos antiguos hemos encontrado agrupaciones de piedras rotas de filos agudos aunque no hay otras piedras en los estratos. Las piedras rotas cubren un amplio espectro de formas, pero todas son del tipo producido por percusión deliberada, de modo que podemos clasificarlas como artefactos indudables. Estos acúmulos de artefactos suelen hallarse sin que se encuentren huesos en cantidades significativas. Propongo designar estos yacimientos como del tipo A.

En algunos casos, una capa de sedimento puede contener a la vez artefactos y huesos animales. Estos hallazgos de huesos y artefactos son de dos categorías. La primera consta de artefactos asociados con huesos que representan el cadáver de un único animal grande; estos yacimientos son los llamados de tipo B. La segunda consiste en artefactos asociados con huesos que representan los restos de varias especies animales distintas; estos yacimientos se designan como de tipo C.

El descubrimiento de yacimientos con estas configuraciones distintas en los sedimentos de Koobi Fora y de Olduvai prueba que cuando los sedimentos que los contenían se estaban depositando, hace de 2,5 a 1,5 millones de años, había por lo menos un tipo de homínido en Africa oriental que habitualmente transportaba objetos, como piedras, de un lugar a otro y fabricaba útiles de bordes afilados al fracturar deliberadamente las piedras que acarreaba consigo. ¿Cómo concuerdan estas pruebas arqueológicas con el registro fósil de los homínidos? Los testimonios fósiles indican que en esta época vivían en esta zona dos y quizá tres especies de homínidos bípedos, de modo que se plantea la cuestión de si puede identificarse la especie responsable de las pruebas arqueológicas.

Por el momento, la mejor hipótesis de trabajo parece ser que estos homínidos, que eran antepasados directos del hombre moderno, fabricaban los utensilios de piedra. Se trata de las formas fósiles, del Pleistoceno temprano, clasificadas por muchos paleontólogos como una especie primitiva del género *Homo.* La cuestión sobre si las especies de homínidos contemporáneos del género *Australopithecus* fabricaban asimismo utensilios o no, debe dejarse de lado como un desafío al ingenio de investigadores futuros. Aquí discutiré simplemente lo que podemos descubrir acerca de las actividades de los primitivos homínidos constructores de artefactos, sin tratar de identificar su posición taxonómica (o sus posiciones taxonómicas).

**EL PAISAJE DE KOOBI FORA, en la proximidad del yacimiento hipopótamo/artefacto, consistía en una llanura de inundación plana cerca de la orilla de un lago** *(sección superior).* **Los exploradores protohumanos encontraron, según parece, el cadáver de un hipopótamo situado en una poza del lecho del arroyo y fabricaron herramientas en aquel lugar para destazar el cadáver. Su actividad dejó un cúmulo de utensilios de piedra dispersos entre los huesos y en el terreno adyacente. La llanura de inundación quedó enterrada bajo capas de limo y ceniza; al erosionarse** *(sección inferior),* **salieron a la luz algunos huesos y herramientas. Su descubrimiento llevó a la excavación.**

## Leyendo las pruebas

Como ejemplos de pruebas arqueológicas indicativas de modelos de subsistencia y de comportamiento de los pri-

meros homínidos, considérense nuestros hallazgos en dos excavaciones en Koobi Fora. La primera es una localidad catalogada como yacimiento hipopótamo/artefacto (YHA), debido a la presencia de huesos fosilizados de hipopótamo y de útiles de piedra.

El yacimiento se halla a 24 kilómetros al este del lago Turkana. Aquí, en 1969, Richard Leakey descubrió una hondonada de erosión que cortaba una antigua capa de ceniza volcánica conocida como toba YKB. (YKB significa yacimiento Kay Behrensmeyer, en honor de la geóloga-paleoecóloga de nuestro equipo de investigación en Koobi Fora que identificó por primera vez el estrato de cenizas en un afloramiento cercano.) El estrato de cenizas corresponde al horizonte superior de un yacimiento sedimentario conocido por los geólogos como Miembro Inferior de la Formación de Koobi Fora; aquí la ceniza había colmatado uno de los muchos canales secos de un antiguo delta. Leakey encontró muchos huesos del cadáver de un único hipopótamo expuesto a la intemperie sobre la erosionada superficie de cenizas; entre los huesos había artefactos de piedra.

J. W. K. Harris, J. Onyango-Abuje y yo mismo supervisamos una excavación que cortaba un afloramiento en el que los sedimentos deltaicos adyacentes todavía no habían sido perturbados por la erosión. Nuestra excavación reveló que el cadáver del hipopótamo había yacido originariamente en una depresión o poza, en el interior de un antiguo canal deltaico. Entre los huesos del hipopótamo y en la orilla del arroyo adyacente recuperamos 119 piedras descantilladas; la mayor parte de ellas eran pequeñas lascas agudas que, aferradas entre el pulgar y los dedos, constituyen utensilios cortantes muy eficaces. Recuperamos también trozos de piedra con chirlas que indicaban que de ellos se habían obtenido lascas por percusión. En la clasificación de los útiles paleolíticos, estas piedras mayores caen en la categoría de útiles básicos o piedras matriz. Además, nuestra excavación sacó un canto rodado de río, fragmentado por ambos extremos; evidentemente, había servido de martillo para sacar lascas de las piedras originales.

Los sedimentos en los que encontramos estos artefactos no contienen piedras de tamaño superior al de un guisante. Parece por tanto claro que los constructores de los útiles acarrearon sus piedras hasta aquí desde algún otro lugar. La asociación entre el cúmulo de artefactos y los huesos de hipopótamo sugiere además que los constructores de herramientas vinieron a este yacimiento transportando piedras y que descantillaron las pequeñas lascas de borde afilado en este mismo lugar para cortar carne del cadáver del hipopótamo. Hasta el momento no disponemos de medios que nos permitan decidir si los propios constructores de herramientas mataron al animal o si ya lo encontraron muerto. Dado el bajo nivel en la tecnología de la piedra testigo, me inclino a sospechar que eran carroñeros más que cazadores.



**MARTILLO DE PIEDRA exhumado en el yacimiento hipopótamo/artefacto. Se trata de un guijarro de basalto de seis centímetros; se muestra aquí levantado de su posición en la superficie del antiguo suelo adyacente a los huesos del hipopótamo. Desgastado y alisado por la acción del agua antes de que llamara la atención de un constructor de útiles hace unos 1,7 millones de años, el guijarro está fragmentado en ambos extremos como resultado de su utilización como martillo.**

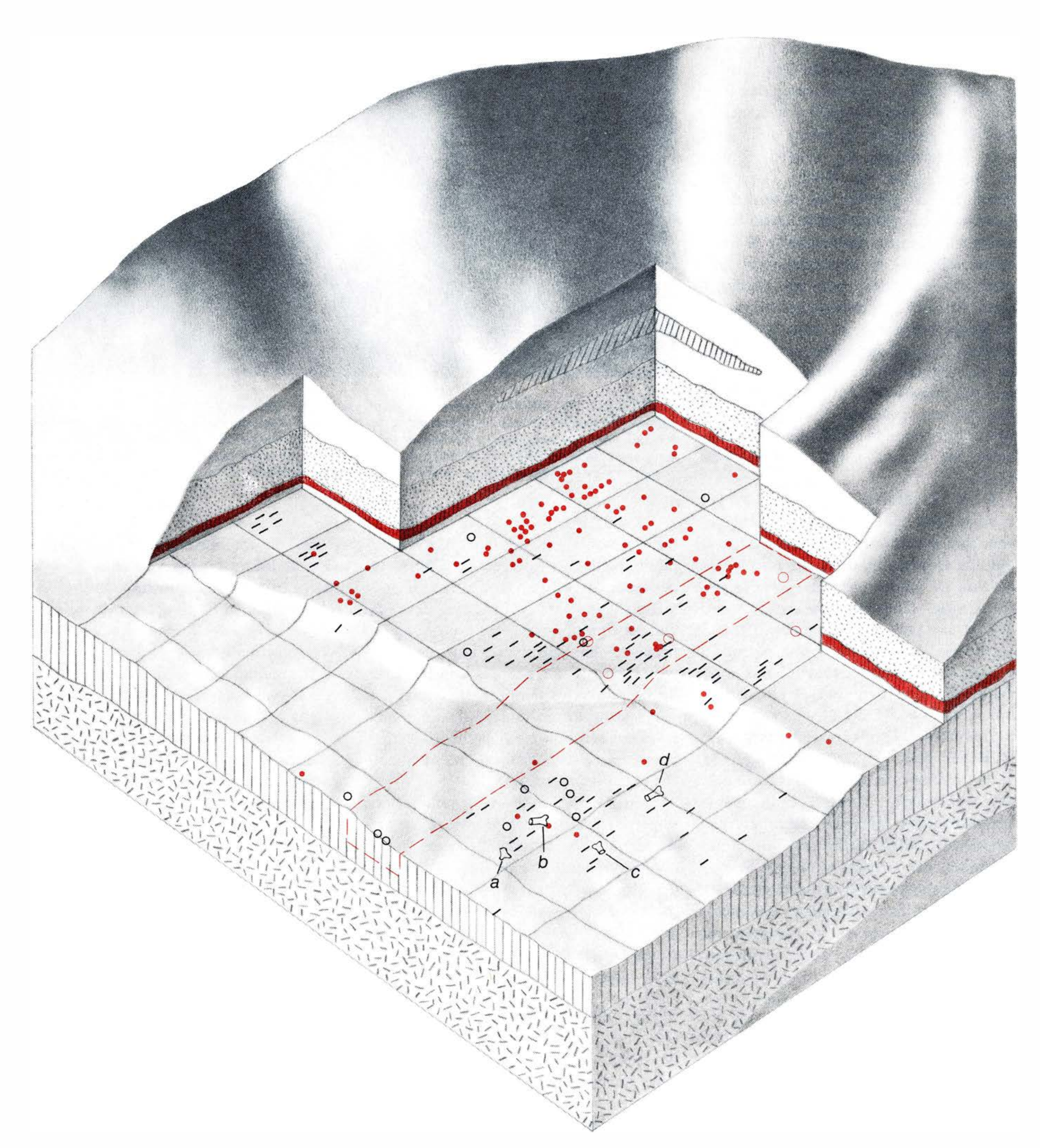
El sedimento YHA se formó hace por lo menos 1,6 millones de años. Las pruebas arqueológicas demuestran que el comportamiento de algunos homínidos de esta época difería del comportamiento de los grandes monos modernos en que estos protohombres no sólo fabricaban utensilios cortantes sino que también comían carne procedente de los cadáveres de grandes animales. El yacimiento hipopótamo/artefacto proporciona así la corroboración de pruebas de un comportamiento similar que obtuvo hace tiempo Mary Leakey en sus excavaciones en el desfiladero de Olduvai.

Este hallazgo no responde a todas nuestras preguntas. Tales protohombres, ¿vagaban por el terreno, recolectando y cazando, como si se tratara de una banda de papiones de nuestros días? ¿Cazaban, por contra, cual una manada de leones? ¿Prevalecía acaso cualquier otra pauta de comportamiento? La excavación de otra asociación de huesos y artefactos, a sólo un kilómetro de distancia del yacimiento hipopótamo/artefacto, nos ha permitido llevar más allá nuestras averiguaciones.

El segundo yacimiento fue localizado por Behrensmeyer en 1969. La erosión estaba exhumando artefactos, junto con pedazos de huesos rotos, en otro afloramiento del mismo estrato de ceniza volcánica que contenía los artefactos y huesos del YHA. Con la colaboración de John Barthelme, de la Universidad de California en Berkeley, y de otros empecé a excavar el yacimiento. El trabajo reveló pronto la presencia de varios cientos de útiles de piedra esparcidos en un área de 16 metros de diámetro. Se hallaban sobre la superficie de un antiguo suelo que había sido cubierto por capas de arena y limo. La concentración de artefactos coincidía exactamente con la dispersión de huesos fragmentados. Bastantes de estos huesos, en particular dientes, eran identificables para demostrar que había partes de los restos de varias especies animales. John M. Harris, del Louis Leakey Memorial Institute de Nairobi, reconoció, entre otras especies, hipopótamo, jirafa, cerdo, puercoespín y algunos bóvidos (antílope acuático, gacela y lo que puede ser tanto ñu como búbalo). Este fue el yacimiento denomi-

nado YKB. Representaba, evidentemente, la segunda categoría de asociaciones de hueso y artefacto: útiles en asociación con restos de muchas especies animales distintas.

Pruebas geológicas obtenidas por A. K. Behrensmeyer, de la Universidad de Yale, y otros indican que el sedimento de YKB se acumuló sobre el lecho arenoso de un arroyo que formaba parte de un pequeño delta. En la época en la que los constructores de herramientas aprovecharon el lecho del arroyo, hacía ya mucho tiempo que por él no corría el agua. Este lugar fue favorecido probablemente como foco de actividad de los homínidos por varias razones. En primer lugar, como sabe cualquier amante de la playa, la arena es confortable cuando uno se sienta o se tiende en ella. En segundo lugar, cavando un agujero de no demasia-




**ESQUEMA DE LOS HALLAZGOS del yacimiento hipopótamo/artefacto. Las cuadrículas tienen un metro de lado. En primer término se encuentran los objetos que resultaron expuestos a la intemperie: huesos de las patas *(a-d)* y dientes *(círculos negros vacíos)* de un hipopótamo, muchos fragmentos de hueso *(trazos cortos)* y unos cuantos artefactos de piedra *(puntos de color)*. La excavación de la zanja *(línea de trazos, color)* y de la colina en una extensa superficie exhumó una antigua superficie de suelo *(color)* que se encontraba sobre un sedimento de toba fangosa. Sobre la antigua superficie había piedras matriz *(círculos de color vacíos)* de las que se habían descantillado lascas de borde agudo, más de 100 artefactos de piedra de otro tipo y más de 60 fragmentos adicionales de dientes y huesos. La dispersión de utensilios y de huesos rotos da pie a la hipótesis de que los constructores de útiles, que acudieron por aquel entonces a ese yacimiento, se alimentaron de la carne del hipopótamo.**

da profundidad en la arena de un lecho fluvial se suele encontrar agua. En tercer lugar, la vegetación de árboles y matorrales en las llanuras de inundación de Africa oriental agostadas por el sol es frecuentemente más densa a lo largo de las corrientes de agua, de modo que en estos lugares se dispone de sombra y de alimento vegetal. También pudiera ser que los constructores de herramientas protohumanos que dejaron sus desperdicios aquí se refugiaran de los depredadores trepando a los árboles y que pasaran asimismo la noche protegidos de este modo.

Gran parte de lo que antecede es especulación, desde luego, pero poseemos pruebas fehacientes de que los objetos del yacimiento YKB se acumularon a la sombra. Los limos arenosos que recubrieron los artefactos desechados y los huesos fracturados se depositaron tan suavemente que fragmentos de piedra suficientemente pequeños para ser arrastrados por el viento no se movieron. En los mismos limos hay impresiones de muchas hojas de árboles. La especie arbórea todavía no ha sido formalmente identificada, pero Jan Gilette, del Kenya National Herbarium, señala que estas impresiones se parecen mucho a las hojas de las higueras salvajes africanas.

## Acarreo de piedras y transporte de carne

Como en el yacimiento de hipopótamo/artefacto, hemos comprobado que no hay piedras de tamaño superior al de un guisante a distancias inferiores a tres kilómetros del yacimiento Kay Behrensmeyer. De este modo, sabemos que las piedras que encontramos en este yacimiento deben haber sido acarreadas, por lo menos desde esta distancia. Con la ayuda de Frank Fitch y de Ron Watkins, de la Universidad de Londres, estamos buscando los lugares de procedencia.

No parece probable que todos los animales de las distintas especies representadas por los huesos de YKB hayan sido sacrificados, en un corto intervalo de tiempo, en este único lugar. Ambas consideraciones apoyan una hipótesis aproximativa y provisional: como las piedras, los huesos fueron transportados allí, presumiblemente, cuando todavía había carne en ellos.

Si esta hipótesis resulta verosímil, el yacimiento Kay Behrensmeyer proporciona una prueba muy precoz del transporte de alimento como atributo protohumano. Hoy día, el transporte de alimento nos parece una trivialidad, pero como señaló hace algunos años Sherwood Washburn, de la Universidad de California en Berkeley, una acción de este tipo le parecería a un mono actual un comportamiento nuevo y muy peculiar. Resumiendo: si puede aceptarse esta hipótesis, ello sugiere que por la época en que se acumulaba el sedimento de YKB habían empezado a producirse varios cambios fundamentales en las disposiciones sociales y ecológicas de los homínidos.

Debe señalarse que en Africa oriental se conocen otros yacimientos antiguos de esta categoría, de modo que el yacimiento Kay Behrensmeyer no es en absoluto único. Mary Leakey ha excavado varios de estos yacimientos en el desfiladero de Olduvai y ha informado sobre ellos. El que mejor se conserva de todos es el yacimiento de *Zinjanthropus* del estrato I de Olduvai, que tiene alrededor de 1,7 millones de años de antigüedad. También aquí una densa agrupación de artefactos desechados coincide con una concentración de huesos rotos.

Existe un número todavía mayor de yacimientos de tipo A (donde se encuentran concentraciones de artefactos, pero los huesos faltan virtual o completamente). Algunos se localizan en Koobi Fora; otros se hallan en el valle de Omo, donde Harry V. Merrick, de la Universidad de Yale, y Jean Chavaillon, del Centro Nacional para la Investigación Científica (CNRS), de Francia, han exhumado recientemente yacimientos de este tipo en los miembros E y F de la formación de Shungura. Los yacimientos de Omo representan hasta ahora las concentraciones de artefactos más antiguas de las datadas con seguridad en todo el mundo; los utensilios fueron abandonados hace unos dos millones de años.

Uno de los yacimientos de Olduvai de esta categoría parece haber sido una "fábrica": una cantera de la que podía obtenerse pedernal, un excelente material para los útiles, fácilmente descantillable. Las otras concentraciones de útiles, con muy pocos huesos asociados o ninguno en absoluto, pueden interpretarse presumiblemente como centros de actividad de los homínidos a los que, por una razón u otra, no se transportaban grandes cantidades de carne. Sin embargo, hasta que sea posible distinguir entre los yacimientos en los que nunca hubo huesos y aquellos otros en los que los huesos desaparecieron simplemente debido a factores tales como putrefacción, estos sedimentos seguirán siendo difíciles de interpretar en términos de ecología de subsistencia.

En definitiva, ¿qué nos enseñan esos estudios arqueológicos en Africa oriental sobre la evolución del comportamiento humano? Por de pronto, aportan pruebas inequívocas de que hace dos millones de años algunos homínidos en esta parte de Africa transportaban cosas, piedras, por ejemplo. Los mismos homínidos fabricaban utensilios cortantes de piedra, aunque simples eficaces; y en ocasiones, se mostraban activos en las proximidades de cadáveres de animales grandes, presumiblemente para conseguir carne. Los estudios sugieren de manera indiscutible que los homínidos transportaban huesos (y carne) de animales y que concentraban esta fuente alimentaria portátil en determinados lugares.

## Modelos de estrategias

Estos datos e indicaciones arqueológicos permiten construir un modelo teórico que explique cómo pudieron estar organizados por lo menos algunos aspectos de la existencia social de los homínidos primitivos. Para la validez del modelo resulta crucial la inferencia de que los distintos grupos de restos que hemos desenterrado reflejan nodos sociales y económicos en la vida de los constructores de herramientas que dejaron atrás estos antiguos acúmulos de desperdicios. En razón de la prueba a favor del transporte de alimento hasta determinados centros o focos, la primera cuestión con la que el modelo debe enfrentarse es por qué los grupos sociales de los homínidos primitivos se apartaron de la norma entre los primates subhumanos actuales, cuyos grupos sociales se alimentan al paso. Por plantearlo de otro modo, ¿qué ventajas ecológicas y evolutivas residen en posponer el consumo de parte del alimento y en transportar esa fracción?

Se han avanzado varias respuestas posibles a esta pregunta. Así, Adrienne Zihlman y Nancy Tanner, de la Universidad de California en Santa Cruz, sugieren que cuando los protohombres recolectaban plantas comestibles en las praderas abiertas, lejos del cobijo de los árboles, habría sido ventajoso para ellos tomar rápidamente los productos vegetales y retirarse a lugares resguardados de los depredadores al acecho. Para otros, cuando los primeros homínidos buscaban alimento dejaban a sus crías en un "nido" o "cubil" (como hacen las aves, los perros salvajes y las hienas), y volvían a intervalos a estos lugares, llevando comida con ellos para colaborar en la alimentación y en el destete de los jóvenes.

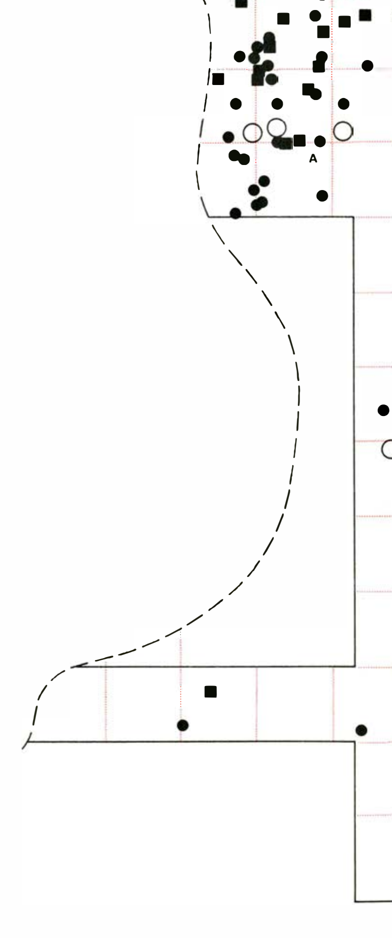
Si observamos los datos obtenidos con respecto a las sociedades humanas primitivas, aparece una tercera posibilidad. En las sociedades humanas primiti-

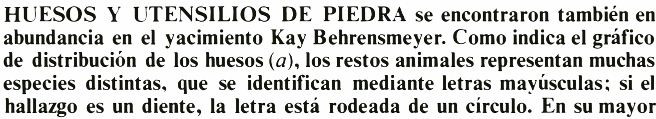
vas, actuales y extinguidas recientemente, el transporte de alimento está asociado a una división del trabajo. La sociedad se halla dividida en clases por edades y sexos, clases que contribuyen característicamente de modo distinto al aporte total de alimento. Resultado significativo de esta división es el aumento en la variedad de alimentos consumidos por el grupo. Para generalizar, y sobre la base de muchos informes etnográficos distintos, las hembras adultas de la sociedad proporcionan la mayor parte del alimento "recolectado"; estos alimentos son, sobre todo, productos vegetales, pero puede tratarse también de mariscos, anfibios y pequeños reptiles, huevos, insectos y similares. Los machos adultos, por lo general, aunque no de manera invariable, proporcionan la mayor parte del alimento "cazado": carne de mamíferos, peces, aves, etcétera. De manera característica, los machos y las hembras se distribuyen en grupos separados, y cada sexo lleva al lugar de residencia por lo menos el sobrante de sus eventuales capturas.

¿Pudo este simple mecanismo de división del esfuerzo de subsistencia haber iniciado el transporte de alimento en los primitivos homínidos? No pueden olvidarse los modelos que sugieren que la seguridad ante los competidores o la alimentación de las crías en el cubil son los mecanismos que iniciaron el transporte de alimentos. No obstante, ninguno de estos modelos me parece tan plausible como el que considera la división del trabajo como el mecanismo iniciador primario. Aun cuando ningún otro argumento apoyara este modelo, sabemos de hecho que en algún punto a lo largo del camino de la evolución del comportamiento humano se establecieron dos pautas: el compartir la comida y una división del trabajo. Si incluimos ambas pautas en nuestro modelo de sociedad homínida primitiva, seremos, si no otra cosa, cuando menos ahorrativos.

Pueden avanzarse otros argumentos en favor de un desarrollo temprano de una división en el trabajo. Por ejemplo, las pruebas de Africa oriental muestran que los constructores de herramientas protohumanos consumían carne de una variedad de especies y de tamaños de animales mucho mayor que las que comen ciertos primates actuales, como el chimpancé y los papiones. En los cazadores-recolectores humanos contemporáneos nuestros, la existencia de una división del trabajo parece hallarse claramente relacionada con el hecho de que las hembras se ven coartadas en sus quehaceres por los niños, una desventaja que les impide cazar o buscar alimento,





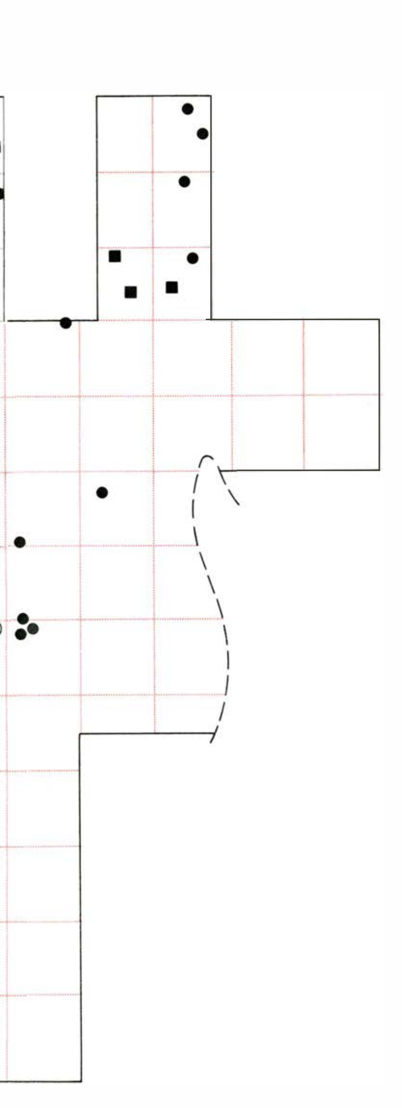
**HUESOS Y UTENSILIOS DE PIEDRA se encontraron también en abundancia en el yacimiento Kay Behrensmeyer. Como indica el gráfico de distribución de los huesos (*a*), los restos animales representan muchas especies distintas, que se identifican mediante letras mayúsculas; si el hallazgo es un diente, la letra está rodeada de un círculo. En su mayor parte se trata de bóvidos de tamaño pequeño o medio, como gacelas, antílope acuático y búbalo (*B*). También estaban presentes restos de cocodrilo (*C*), jirafa (*G*), hipopótamo (*H*), puercoespín (*P*) y de especies extintas de cerdo (*S*). Los puntos y los trazos señalan la localización de fragmentos no identificados de dientes y de huesos, respectivamente.**

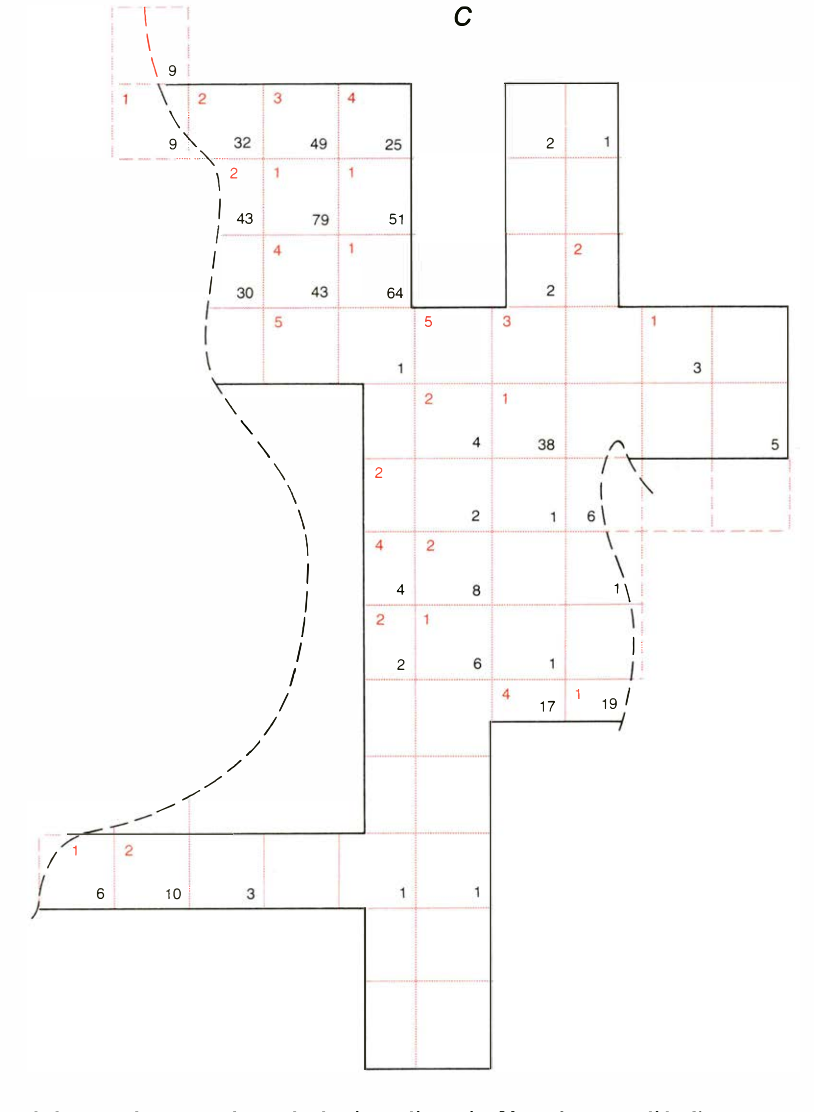
actividades que requieren velocidad a pie o movilidad de largo alcance. Asimismo, para los protohombres, la incorporación de carne en la dieta en cantidades significativas bien pudo haber sido un factor clave en el desarrollo no sólo de una división en el trabajo, sino también de la organización de movimientos alrededor de un lugar de residencia y del transporte y reparto de alimento.

El modelo que propongo para su verificación interpreta el hecho de compartir el alimento como el comportamiento fundamental de un complejo de adaptaciones totalmente nuevas que incluían, como componentes críticos, la caza y/o el carroñeo, la recolección y el transporte. Hablando metafóricamente, compartir el alimento proporciona al modelo una especie de plataforma central. El sistema adaptativo que yo imagino, sin embargo, pudo haber funcionado únicamente mediante el empleo de utensilios y otros pertrechos. Por ejemplo, sin la ayuda de un artefacto de transporte, los primates como nosotros o nuestros antepasados no podrían haber acarreado desde el campo al lugar de residencia una cantidad suficiente de alimento vegetal que valiera la pena compartir. Un objeto tan poco complicado como una artesa de corteza habría servido para este fin, pero a la vez algún artefacto de este tipo habría sido obligado. De hecho, Richard Borshay Lee, de la Universidad de Toronto, ha sugerido que la invención básica que hizo posible la evolución humana fue un artefacto de transporte.

¿Qué decir acerca de los utensilios de piedra? Nuestros antepasados, como nosotros mismos, pudieron despedazar probablemente el cuerpo de un pequeño animal, como hacen los chimpancés, con sólo manos y dientes. Sin embargo, es difícil imaginarlos, o imaginarnos a nosotros, comiendo la carne de un elefante, un hipopótamo o algún otro animal grande sin la ayuda de adminículos de corte. Como las pruebas arqueológicas demuestran de manera abundante, los protohombres de Africa oriental no sólo sabían cómo producir tales lascas de piedra mediante percusión, sino que las encontraban tan útiles que acarreaban la materia prima que precisaban para fabricar sus artefactos de un lugar a otro. Así, mientras que la existencia del artefacto de transporte que requiere el modelo sigue siendo hipotética por lo que se refiere a las pruebas arqueológicas, en cambio el hecho de que se empleaban y se transportaban utensilios está ampliamente demostrado.

A este respecto debe señalarse que las pruebas arqueológicas son también mu-






**El gráfico de la distribución de artefactos (*b*) muestra que tres de las cuatro piedras matriz (*círculos vacíos*), la mayor parte de la piedra desechada (*cuadrados*) y las lascas y fragmentos de lascas (*puntos*) se encontraban en 12 cuadrados adyacentes. Aquí se encontró también una piedra no trabajada *(A)* que, como las piedras matriz, debió ser acarreada hasta este lugar desde cierta distancia. No se ha pretendido disponer en el gráfico todos los utensilios y huesos encontrados en el yacimiento. Los números de la cuadrícula (*c*) indican la cantidad de lascas y fragmentos de piedra de desecho (*color*) y de fragmentos de hueso (*negro*) que se registraron, sin poder llegar a localizarlos exactamente, en cada cuadrado.**

das en lo que al consumo protohumano de alimento vegetal se refiere. Tanto la morfología como los modelos de desgaste observables en los dientes de los homínidos sugieren un componente vegetal en la dieta, y lo mismo ocurre con los datos comparativos sobre las pautas de subsistencia en los primates vivos no humanos y en las sociedades humanas no agrícolas. No obstante, si hay que encontrar pruebas directas, deberemos aguzar nuestro ingenio, quizá dirigiéndonos al análisis geoquímico orgánico. Parece evidente que mientras no corrijamos el desequilibrio creado por la perdurabilidad de los huesos en comparación con la de los restos vegetales, los estudios de la evolución humana tenderán a tener prejuicios a favor de los machos.

En cuanto concierne al modelo, la cuestión clave no es si se comían alimentos recolectables (frutos, nueces, tubérculos, verduras e incluso insectos), sino si estos protohombres transportaban tales alimentos. A falta de cualquier prueba del consumo de alimentos vegetales, volveré al argumento de que el sistema que propongo habría funcionado mejor si la contribución al grupo social del cazador-carroñero móvil hubiera estado equilibrada por la recolección de alimentos vegetales de alta calidad por parte del recolector-transportista. Lo que es seguro es que en algún momento durante los últimos millones de años una división del trabajo de este tipo resultó ser el tipo normal de comportamiento entre los antepasados del hombre moderno.

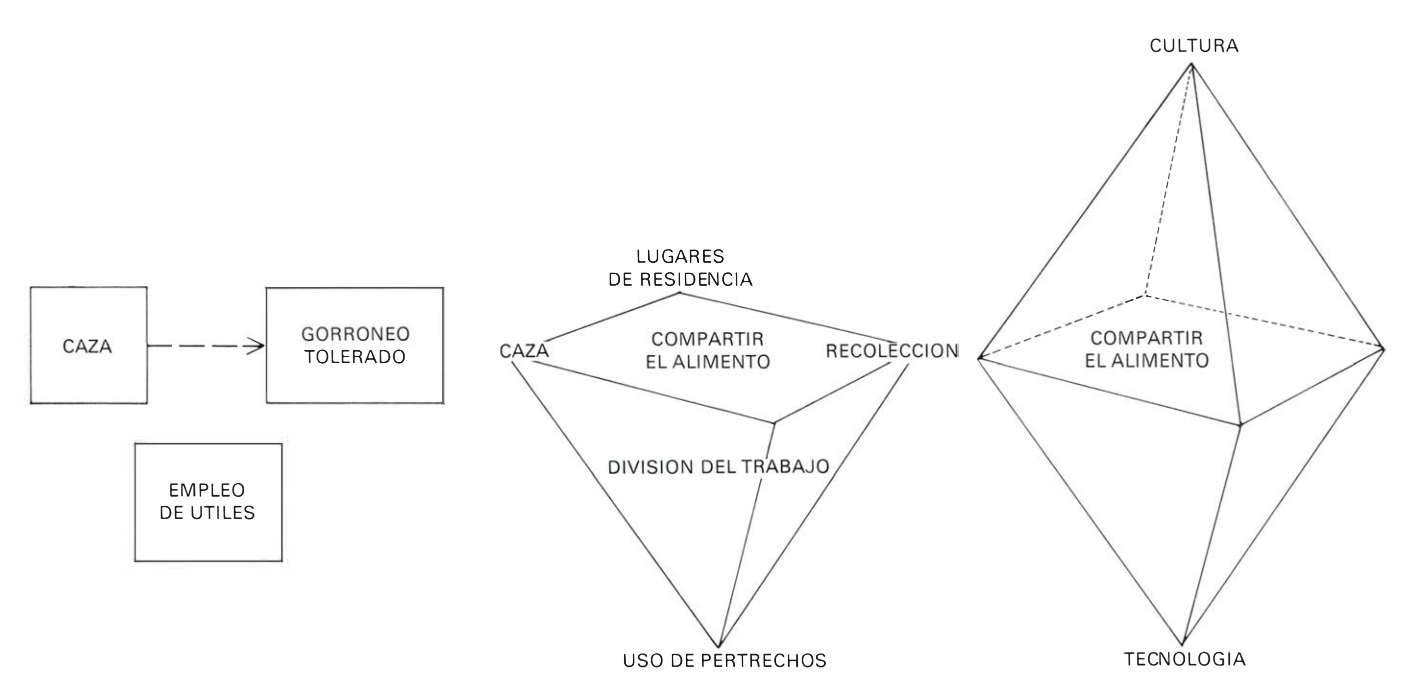
Una última consideración de advertencia acerca del modelo. El lector habrá notado que he utilizado cuidadosamente las palabras "cazador" y "cazar". Ello se debe a que no podemos juzgar qué cantidad de la carne ingerida por los protohombres de Africa oriental procedía de un carroñeo oportunista y qué cantidad se obtenía cazando. Es razonable suponer que los cadáveres de animales matados por carnívoros y los de animales que habían muerto o que habían resultado incapacitados de otro modo habrían proporcionado siempre a los carroñeros activos una cierta cantidad de carne. En la actualidad parece menos razonable suponer que los protohombres, armados de manera primitiva, si es que lo estaban, hubieran sido cazadores particularmente eficaces. Hoy se está intentando distinguir (en particular por parte de Elizabeth Vrba, de Sudáfrica) entre agrupaciones de huesos atribuibles a carroñeo y agrupaciones atribuibles a caza, pero todavía no se dispone de hallazgos correspondientes a Africa oriental. Por el momento prefiero aceptar el veredicto de J. Desmond Clark, de la Universidad de California en Berkeley, y de Lewis R. Binford, de la Universidad de Nuevo México. En su opinión, los primeros comedores de carne pudieron haber obtenido la carne de animales de hasta 30 kilogramos de peso mediante la caza deliberada, pero la carne de animales mayores probablemente sólo se encontraba a su disposición en forma de carroña.

**LA MEZCLA DE LOS ACUMULOS de artefactos y de huesos en el yacimiento Kay Behrensmeyer es evidente cuando se superponen los gráficos de distribución de piedras *(color)* y de huesos *(negro)*. A veces, la acción de corrientes de agua produce combinaciones de este tipo, pero no parece que éste sea el caso aquí, como lo atestigua la preservación de impresiones foliares y de otros restos que pronto hubieran sido acarreados por las aguas, como finas esquirlas de piedra. Sí parece, en cambio, que los protohombres que fabricaron y abandonaron sus útiles en este lugar fueron los responsables de la acumulación de huesos, porque se dieron cita aquí para compartir su alimento.**

## Los útiles como testimonio

Como es obvio, el modelo adaptativo que he aventurado refleja sólo una hipótesis de trabajo y no un hecho establecido. No obstante, existen pruebas suficientes a su favor para justificar ulteriores consideraciones acerca de su posible implicación en el decurso de la evolución humana. Por ejemplo, el modelo implica claramente que los primitivos homínidos constructores de herramientas exhibían ciertas pautas de comportamiento que, entre las pautas de comportamiento de todos los primates, caracterizan de manera única a nuestra propia especie y la separan de sus parientes vivos más cercanos: los grandes monos antropoides. ¿Significa esto que los homínidos constructores de herramientas de hace 1,5 a 2 millones de años eran, de hecho, "humanos"?

Presumo que no, y he procurado caracterizar a estos pioneros de Africa oriental como protohombres. Al resumir los contrastes entre los hombres actuales y los monos contemporáneos he colocado en los primeros lugares de la lista el lenguaje y los fenómenos culturales que dependen de él. No tenemos forma




**COMPARACION DE PAUTAS DE COMPORTAMIENTO que difieren en su grado de organización. Los grandes monos actuales, ejemplificados aquí por el chimpancé, exhiben pautas de comportamiento que resultaron importantes en la evolución humana, pero estas pautas** *(izquierda)* **existen sobre todo en forma de elementos aislados. La caza existe a pequeña escala, pero conduce sólo a un "gorroneo tolerado" en lugar de a compartir el alimento de manera activa; algo semejante ocurre con el uso de utensilios, que, aunque lo practican, no está integrado con la caza ni con el gorroneo. El modelo del autor** *(centro)* **integra estas tres pautas de comportamiento y otras en una estructura coherente. Compartir el alimento se considera un elemento estructural fundamental, que incorpora la provisión de alimento animal y vegetal, la organización de un lugar de residencia y una división del trabajo. Como soporte de la estructura integrada existe una infraestructura necesaria de manufactura de útiles y pertrechos; por ejemplo, sin dispositivos para transportar alimento no podría haber división del trabajo ni compartirse la comida de modo organizado. En las sociedades humanas modernas** *(derecha)* **la estructura de compartir el alimento ha sufrido una complicación socioeconómica. Su infraestructura incorpora la tecnología, y ha surgido una superestructura similar para asumir otros elementos "culturales".**

directa de saber si alguno de estos homínidos primitivos tenía lenguaje o no. Y, sin embargo, sospecho que el principal cambio evolutivo acaecido en la estirpe homínida, que condujo a la plena humanización durante los últimos dos millones de años, fue la gran expansión del lenguaje y de la capacidad de comunicación, junto con las posibilidades cognitivas y culturales relacionadas de manera integral con el lenguaje. ¿En qué baso mi opinión?

Un humilde indicador de la expansión de la capacidad mental es la serie de cambios que aparece en el registro material disponible de mayor perdurabilidad para nosotros: los útiles de piedra. Los primeros útiles del período que estamos considerando aquí muestran, a mi entender, una variación de formas simples y oportunistas que reflejan únicamente una capacidad empírica nada complicada de una sola habilidad: cómo fracturar piedras por percusión, de manera que se obtengan fragmentos con bordes afilados. En este estadio de la fabricación de herramientas, el constructor imponía a sus artefactos un mínimo de formas dictadas culturalmente. Tan simples útiles de piedra realizan perfectamente bien las funciones básicas que sostienen el progreso que lleva a la hominización, por ejemplo: desbastar un palo para cavar o para convertirlo en venablo, hacer un recipiente de corteza, o destazar el cadáver de un animal.

El hecho es que precisamente estos simples útiles de piedra han sido fabricados y empleados continuamente desde su primera invención hasta nuestros días. Sin embargo, la arqueología también enseña que durante los últimos cientos de miles de años algunos conjuntos de útiles de piedra empezaron a reflejar una mayor complejidad cultural en sus constructores. La complejidad aparece primero en la imposición de formas de útiles más arbitrarias; a estos cambios siguió un aumento en el número de tales formas. Existe un notable contraste entre el puro oportunismo aparente en el acabado de los primeros útiles de piedra y la ordenada disposición de formas que surge más tarde, en la Edad de Piedra Temprana, época en la que cada tipo está representado por numerosos ejemplos patrón en cada conjunto de utensilios. El contraste sugiere de manera inevitable que los primeros constructores de herramientas carecían de la capacidad mental y cultural altamente desarrollada de los hombres más recientes.

El testimonio de homínidos fósiles junto con la presencia de sus propios artefactos da a entender que estos primitivos artesanos eran homínidos no humanos. Imagino que si tuviéramos una máquina del tiempo y pudiéramos visitar un lugar como el yacimiento Kay Behrensmeyer en el momento de su ocupación original, encontraríamos homínidos que vivirían en grupos sociales muy parecidos a los de los demás primates superiores. Las diferencias se harían patentes sólo después de prolongadas observaciones. Quizás al despuntar el día observaríamos un grupo que se dividiría al marcharse algunos de sus miembros en una dirección y otros en otra. Todos estos subgrupos, muy probablemente, se alimentarían de manera intermitente mientras se desplazaban y encontraban alimento vegetal ubicuo y de baja calidad (bayas, por ejemplo), pero bien podríamos observar que algunos de los alimentos de mayor calidad (grandes tubérculos o los cuartos traseros de un cadáver) eran reservados para el consumo del clan cuando los grupos de búsqueda de alimento volvieran a encontrarse en el punto de partida.

Para el observador instalado en la máquina del tiempo un comportamiento de este tipo, tomado en el contexto de la práctica de los primitivos homínidos de construir útiles y pertrechos, resultaría quizá familiarmente "humano". Si, como es de suponer, los homínidos en obser-

vación se comunicaran sólo como lo hacen los chimpancés, o quizá mediante señales protolingüísticas muy rudimentarias, entonces el observador podría creer que asistía a las actividades de algún tipo de mono bípedo fascinante. Cuando uno se basa en la arqueología para reconstruir la vida protohumana, debe resistirse con fuerza a la tentación de proyectar demasiado de nosotros mismos en el pasado. Según ha señalado Jane B. Lancaster, de la Universidad de Oklahoma, el sistema de vida de los homínidos de hace dos millones de años no tiene ningún equivalente actual.

## Avances sociales

Mi modelo de adaptación de los homínidos primitivos puede hacer algo más que indicar que los primeros constructores de utensilios eran culturalmente protohumanos. Puede asimismo ayudar a explicar la dinámica de ciertos avances significativos a largo plazo en el desarrollo de la humanidad. Por ejemplo, puede imaginarse que una organización social en los homínidos que supusiera cierta división del trabajo y cierto grado de reparto de alimentos bien pudo haber funcionado, incluso si sus capacidades de comunicación fueron poco más avanzadas que las de los actuales chimpancés. En un sistema de subsistencia tan simple, sin embargo, cualquier grupo cuyos miembros pudieran, además de intercambiar alimento, intercambiar información, habría ganado una ventaja selectiva crítica sobre todos los restantes. Los recolectores de un grupo así podrían informar sobre oportunidades de caza o de carroñeo que hubieran observado, y los cazadores podrían informar a los recolectores acerca de cualquier tipo de alimentos vegetales que hubieran encontrado.

Por la misma razón, el ajuste fino de las relaciones sociales, siempre un asunto de importancia entre los primates, se hace doblemente importante en un sistema social que implica el intercambio de alimento. En las modernas sociedades humanas, el lenguaje sirve no sólo para el intercambio de información, sino como instrumento de ajuste social e incluso para el intercambio de falsa información.

El compartir el alimento y los tipos de comportamiento asociados con ello desempeñaron probablemente un papel importante en el desarrollo de sistemas de obligaciones sociales recíprocas que caracterizan a todas las sociedades humanas de las que tenemos información. Las investigaciones antropológicas muestran que cada ser humano en un grupo se halla ligado a otros muchos miembros del grupo por lazos sociales y económicos. El antropólogo francés Marcel Mauss, en su obra clásica, "Ensayo sobre el regalo", publicada en 1925, mostraba que los lazos sociales suelen ser recíprocos en el sentido de que aunque los beneficios derivados de una relación pueden inicialmente dirigirse en una sola dirección, existe la expectativa de un retorno futuro de ayuda en época de necesidad. La formación y la gestión de tales lazos precisa de la capacidad de calcular complejas cadenas de contingencias que se proyectan muy lejos en el futuro. Una vez el compartir el alimento se convirtió en parte del comportamiento protohumano, la necesidad de esta capacidad de calcular y planear debió proporcionar una parte importante de la base biológica para la evolución del intelecto humano.

El modelo puede ayudar asimismo a explicar el desarrollo de las disposiciones matrimoniales humanas. El modelo supone que, en las poblaciones protohumanas primitivas, los machos y las hembras dividían entre sí las tareas de subsistencia, de modo que cada sexo aprovechaba de manera preferente un tipo distinto de recurso alimentario y después compartía en el interior de un grupo social algo de lo que había obtenido. En tales circunstancias, un sistema de apareamiento que supusiera por lo menos un macho que procurara el alimento "familiar" en beneficio de cada una de las hembras que cuidaba de su cría en el grupo tendría una clara ventaja selectiva sobre, por ejemplo, la pauta de los chimpancés de relaciones oportunistas entre los sexos.

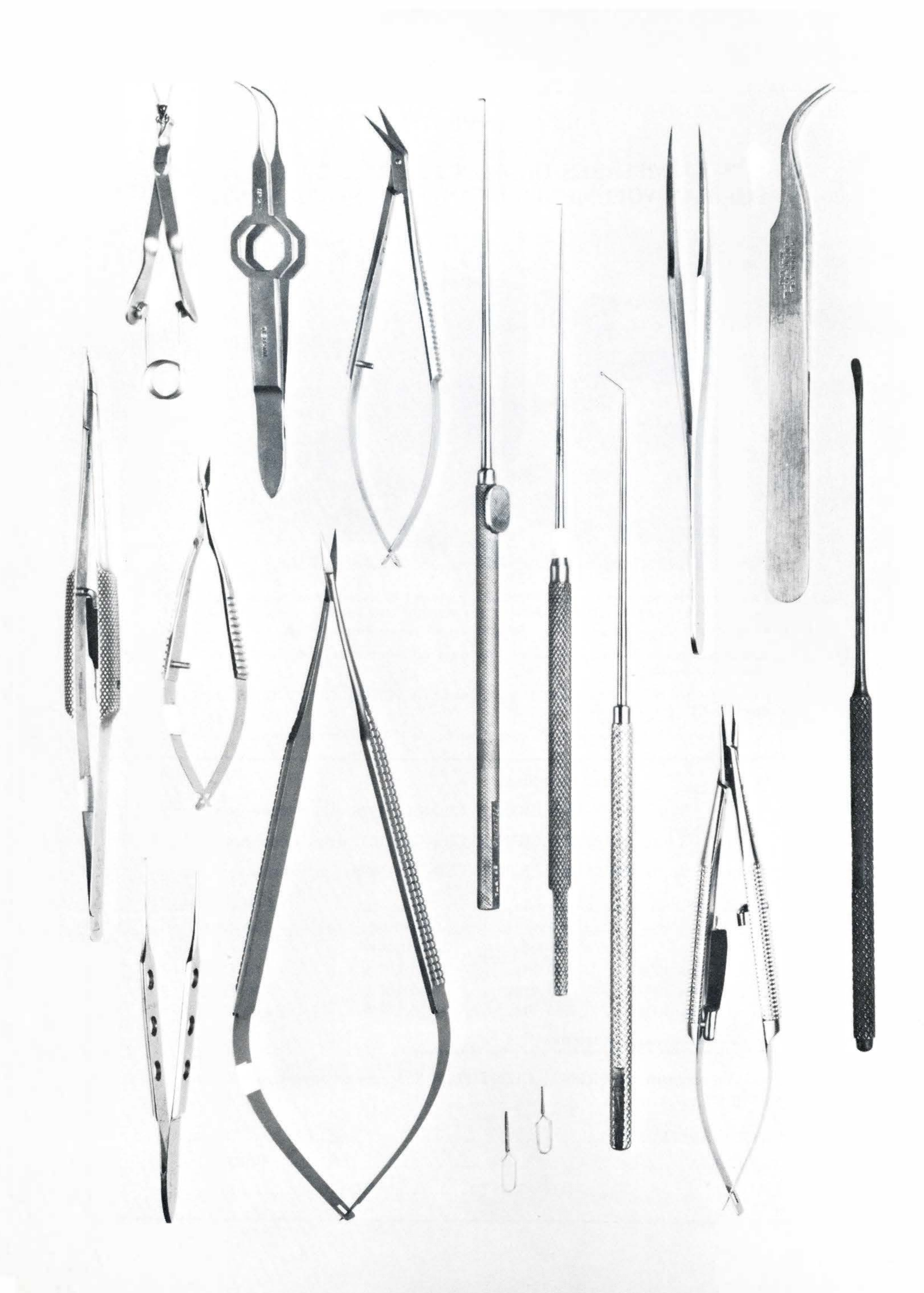
He destacado el hecho de compartir el alimento como un principio central para la comprensión de la evolución humana a lo largo de los dos últimos millones de años aproximadamente. También he aducido pruebas arqueológicas de que el compartir los alimentos era un tipo de comportamiento establecido entre los primitivos protohombres. La idea está lejos de ser nueva: se halla implícita en muchas especulaciones filosóficas y en muchos textos de paleoantropología. La novedad de mi aportación estriba en explicitar esa hipótesis, de suerte que pueda comprobarse y revisarse.

## Explicando la evolución

Así pues, la hipótesis del compartir la comida se añade ahora a otras hipótesis que se han formulado para dar razón del curso de la evolución humana. Cada hipótesis de éstas tiende a sostener que una u otra innovación en el comportamiento protohumano fue la fuerza crítica que produjo el cambio. Por ejemplo, se ha argumentado que los útiles fueron los "primeros motores". Aquí la suposición implícita es que, en cada generación sucesiva, los individuos más capacitados fabricaban utensilios mejores, y, por tanto, obtenían ventajas que favorecían la transmisión de sus genes mediante la selección natural; se supone que esta mayor capacidad se aplicó más tarde a aspectos de la vida distintos de la tecnología. Otra hipótesis remite la fuerza conductora a la caza; en efecto, la caza requiere inteligencia, destreza, coordinación neuromuscular especializada y, en el caso de caza en grupo, cooperación. Entre otros primeros motores que se han sugerido figuran prácticas como el transporte y la recolección.

Si comparamos la explicación que se funda en el compartir el alimento con estas razones alternativas observamos que, de hecho, el compartir el alimento incorpora muchos aspectos de cada una de las demás. Se advertirá también que, en el modelo de compartir el alimento, los elementos aislados se tratan como formando parte de un sistema complejo y flexible. El mismo modelo es probablemente una versión muy simplificada de lo que realmente ocurrió, pero parece suficientemente realista como para que merezca ser probado mediante ulteriores investigaciones arqueológicas y paleontológicas.

Finalmente, puede apreciarse que el modelo de compartir la comida guarda interconexiones con las implicaciones físicas de la anatomía de los homínidos fósiles. Por ejemplo, un prerrequisito para compartir el alimento es la capacidad de acarrear cosas. Esta capacidad a su vez se ve muy facilitada por una postura bípeda habitual. Como ha señalado Gordon W. Hewes, de la Universidad de Colorado, una parte importante de la divergencia evolutiva inicial de los homínidos respecto de sus parientes primates muy bien pudiera haber sido la propensión y la capacidad de transportar cosas de un lugar a otro. Para mí es igualmente plausible que las presiones de selección física que produjeron un aumento en el tamaño del cerebro protohumano, y por ello aumentaron seguramente la capacidad de los homínidos para la comunicación, son una consecuencia del cambio que va de una alimentación individual a compartir la comida, cambio que se produjo hace unos dos millones de años.



# Cirugía microvascular en el ictus cerebral

*El microscopio operatorio y los microinstrumentos constituyen nuevos avances tecnológicos que han hecho posible intervenciones quirúrgicas que permiten aumentar el flujo sanguíneo cerebral*

Jack M. Fein

En las últimas décadas, cada vez es mayor el número de enfermedades del sistema nervioso que son tributarias de intervención quirúrgica, pero los esfuerzos de los neurocirujanos se ven limitados muchas veces por la imposibilidad de ver claramente y manipular estructuras de tamaño muy pequeño con las que tienen que habérselas. En los últimos cinco años el empleo de una nueva tecnología basada en el microscopio operatorio y en la microinstrumentación ha hecho posible redistribuir el flujo sanguíneo de una arteria del cuero cabelludo, a través del cráneo, a una de las arterias que nutren al cerebro. Este nuevo procedimiento de pontaje ("by-pass") puede prevenir el ictus cerebral en algunos enfermos propensos a sufrirlo; puede evitar que se repita el ictus en enfermos que ya lo han sufrido y en algunos puede incluso lograr una recuperación parcial de la función perdida.

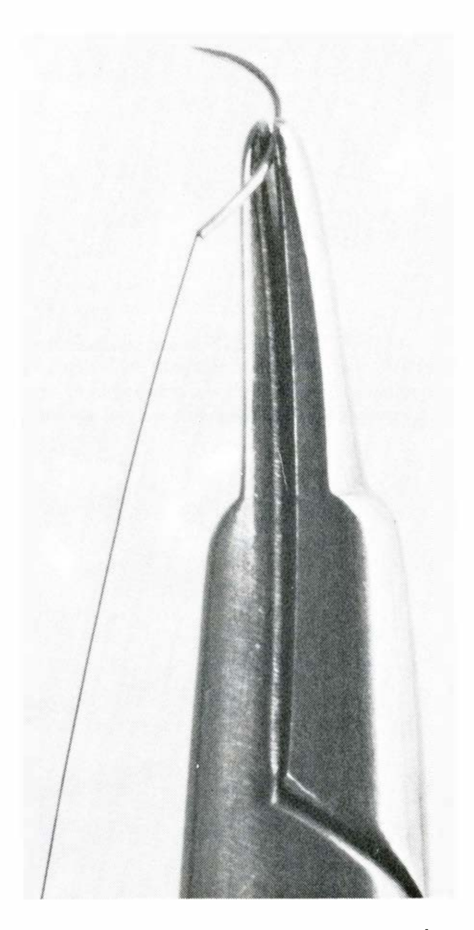
El ictus cerebral se debe a una interrupción súbita del flujo sanguíneo que resulta de la obstrucción o ruptura de una arteria que alimenta al cerebro. La compleja actividad electrofisiológica del cerebro requiere un soporte nutritivo continuo y de alto nivel. Cualquier reducción significativa del aporte de oxígeno sanguíneo y de glucosa afecta la función cerebral; la interrupción total del flujo por más de cuatro minutos de duración produce invariablemente un daño extenso e irreversible del área afectada. El ictus cerebral o accidente cerebrovascular es, con gran diferencia, la enfermedad más grave y frecuente del sistema nervioso y constituye un problema importante de salud pública en Occidente. El 30 por ciento de las 500.000 nuevas víctimas de ictus cerebral que ocurren cada año en los Estados Unidos mueren a los 30 días; la mitad de los que sobreviven requieren un cuidado institucional crónico.

**MICROINSTRUMENTOS, fotografiados, a la izquierda, en su tamaño natural, para manipular, cortar y suturar las pequeñas arterias que se empalman en las intervenciones de pontaje microvascular. El portador de microagujas aparece a la izquierda.**

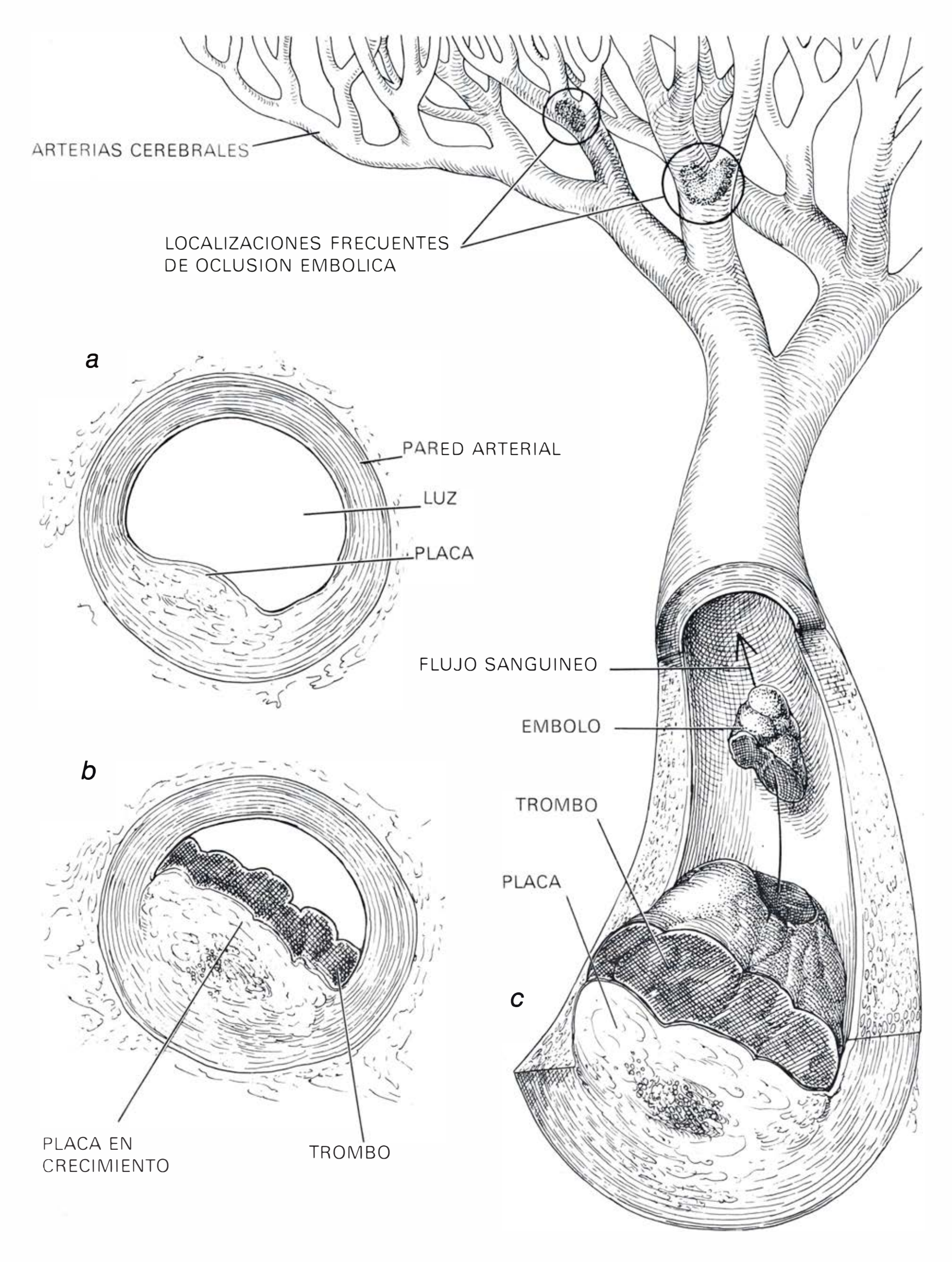
La mayoría de los accidentes cerebrales (el 78 por ciento según el estudio de las enfermedades cardiovasculares de Framingham) son debidos a la obstrucción de una arteria por un coágulo sanguíneo: un trombo o un émbolo. Estos son los accidentes que en ocasiones pueden prevenirse o tratarse mediante la cirugía microvascular. (Las hemorragias debidas a la rotura de una arteria causan el 17 por ciento de los ictus según el estudio de Framingham; el 5 por ciento restante se deben a otras causas.) El coágulo está facilitado muchas veces por la aterosclerosis, que estrecha la luz de la arteria y predispone a la oclusión del vaso por trombosis o embolia.

La capa más interna de una pared arterial normal, la íntima, está recubierta de células endoteliales unidas al tejido conjuntivo elástico y al colágeno. La íntima constituye un conducto liso y sin interrupción por el que pasa la sangre. La capa siguiente es la media, formada básicamente por una envoltura (como los neumáticos radiales) de células musculares lisas que se contraen y relajan para mantener un flujo de sangre prácticamente constante a pesar de que la presión varía. La capa más externa, la adventicia, tiene tejido conjuntivo de sostén, los nervios y los pequeños vasos sanguíneos que nutren la arteria. En la aterosclerosis se presenta una proliferación de las células musculares lisas que penetran en la íntima y un acúmulo de grasas, material fibroso y detritus celulares que dan lugar a una lesión en forma de placa abombada (ateroma), que destruye la superficie endotelial lisa y obstruye parcialmente la luz del vaso.

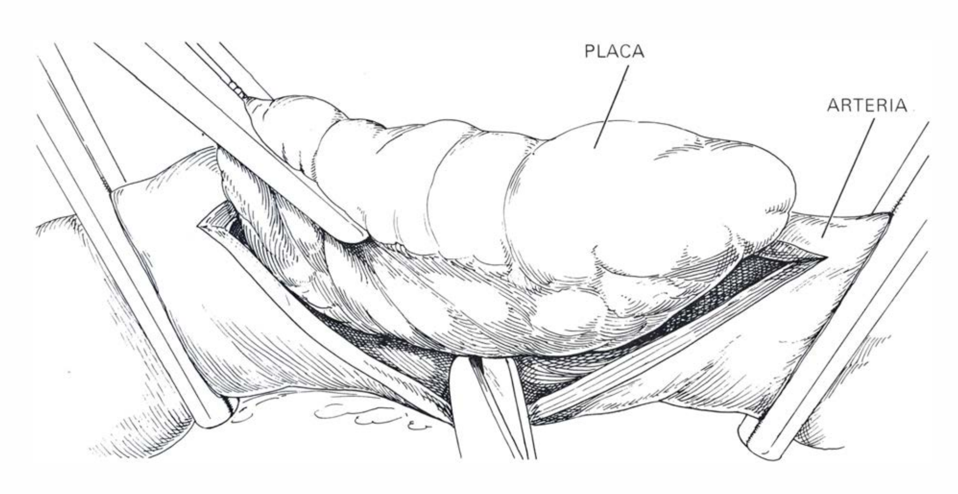
El contacto de las plaquetas de la sangre circulante con las fibras colágenas adyacentes a las células endoteliales produce alteraciones en su membrana externa; las plaquetas se tornan pegajosas y se conglomeran en un amasijo que inicia la formación de fibrina, una proteína que participa en el proceso de coagulación, a partir del fibrinógeno proteico. La fibrina forma una red que



**PUNTA DEL PORTAAGUJAS de la página anterior, aumentada aquí 10,5 veces. Sujeta una microaguja de unos dos milímetros de longitud con sutura de 20 micras de diámetro.**




**LA ATEROSCLEROSIS puede producir un ictus cerebral. La placa aterosclerótica engruesa la pared de las arterias y estrecha su luz *(a)*. Puede favorecer la formación de trombos o coágulos sanguíneos *(b)*, que crecen y ocluyen la arteria. Puede desprenderse una parte del coágulo y pasar a la circulación, constituyendo un émbolo que puede ocluir una rama más pequeña de la arteria *(c)*.**



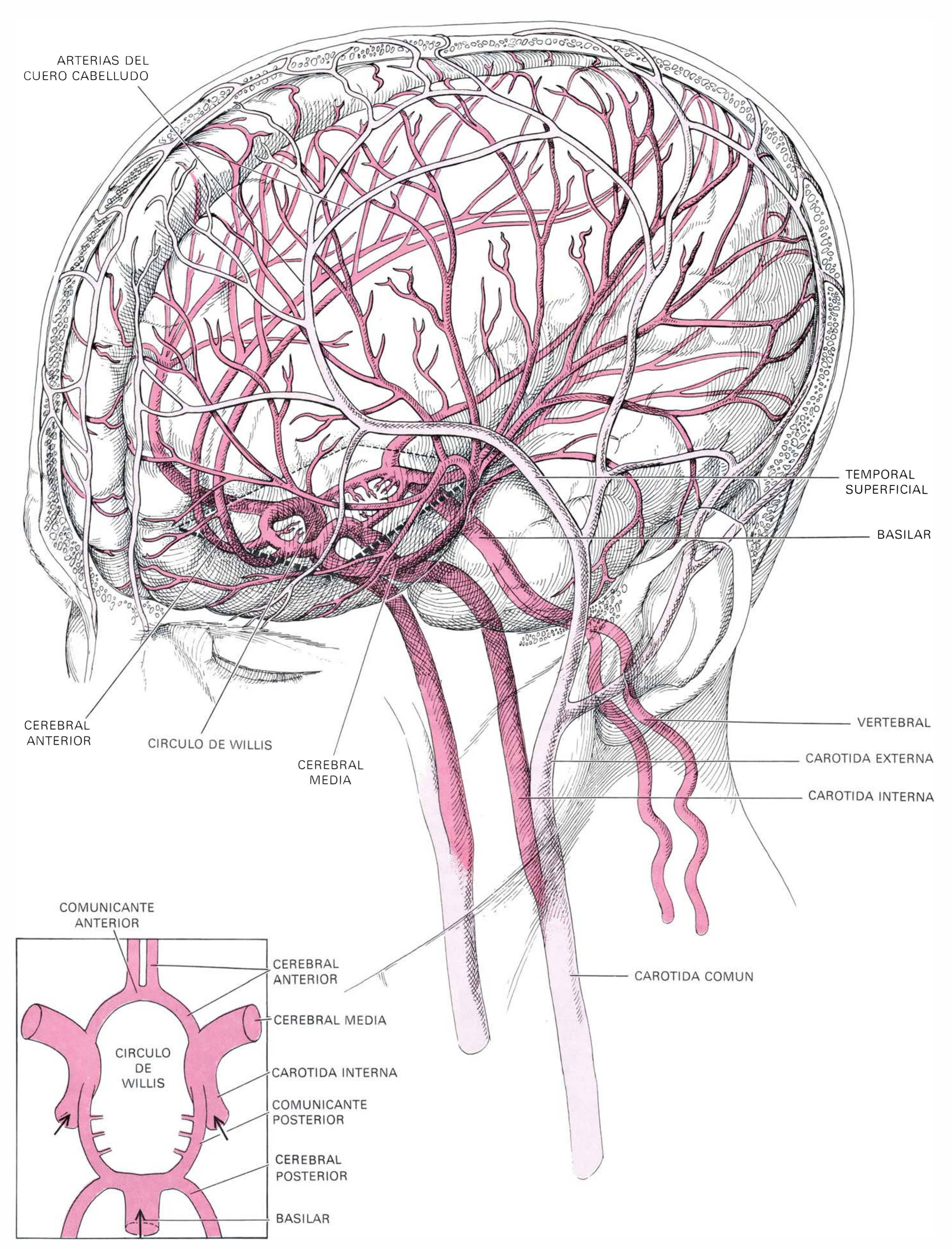

**ENDARTERIECTOMIA, que se practica para extirpar la lesión obstructiva de una arteria que posee un tamaño relativamente grande, como la carótida común. Se incide la pared de la arteria, se extrae el trombo y se extirpa el material de la placa aterosclerótica con parte de la íntima adyacente.**

atrapa nuevas plaquetas y células rojas, dando lugar a la formación de un trombo. La asociación de ateroma y trombosis puede estrechar la luz del vaso llegando a reducir el flujo sanguíneo que irriga el cerebro; a medida que progresa la enfermedad, se va ocluyendo la arteria. Otra posibilidad es la de que se fragmente el trombo y se convierta en un émbolo móvil que, transportado por la corriente sanguínea, llega a atascarse en una arteria cerebral de diámetro más pequeño, de preferencia en un punto de ramificación,obstruyéndola.

La arterosclerosis puede dar también lugar a insuficiencia arterial en otros órganos (tales como el corazón y los riñones) y las extremidades inferiores. Sin embargo, el efecto sobre el cerebro es particularmente ominoso, porque dicho órgano es extraordinariamente sensible a los insultos circulatorios y, sobre todo, porque los resultados del accidente vascular son devastadores. El cerebro es muy sensible a la interrupción del flujo sanguíneo porque sus reservas energéticas son escasas. No ocurre lo mismo en el corazón y en el músculo voluntario, en los que la glucosa puede almacenarse en forma de glucógeno. En cambio, en el cerebro las sustancias nutritivas se metabolizan rápidamente para producir trifosfato de adenosina (ATP), compuesto rico en energía que facilita las funciones especializadas de las células nerviosas y mantiene su estructura.

Esta es la razón por la que el cerebro tolera muy mal la oclusión de arterias importantes. El cerebro puede soportar obstrucciones parciales del flujo de una arteria que nutre a una región localizada, si existe una circulación colateral adecuada a través de los canales interarteriales, que pueden dilatarse rápidamente cuando la presión sanguínea cae al obstruirse la arteria de mayor tamaño. La cantidad de tejido cerebral que sobrevivirá al accidente vascular no depende tanto del tamaño o la localización de la obstrucción, cuanto de la capacidad de esta circulación colateral para mantener el flujo sanguíneo en torno a dicha obstrucción localizada.

La sangre llega a la cabeza y al cerebro a través de las arterias carótida derecha e izquierda y de las arterias vertebrales derecha e izquierda. La arteria carótida común derecha y la vertebral nacen del tronco innominado, que es una rama de la aorta; la arteria vertebral izquierda nace de la subclavia izquierda y el tronco carótido común izquierdo nace directamente de la aorta. La arteria carótida común de ambos lados se divide a nivel




**ARTERIAS MAYORES de ambos lados del cerebro y del cuero cabelludo. La carótida externa se distribuye para nutrir las arterias del cuero cabelludo** *(color claro);* **la arteria carótida interna y la vertebral suministran a los vasos que nutren el cerebro** *(color obscuro).* **Las arterias comunicantes, anterior y posterior, las cerebrales anteriores y posteriores y un segmento de las carótidas internas forman el círculo de Willis** *(señalado por la línea negra de trazos interrumpidos y dibujado en el recuadro inferior),* **a través del que puede fluir perfectamente la sangre.**

1

ARTERIA DEL CUERO CABELLUDO

CRANEOTOMIA

INCISIONES EN EL CUERO CABELLUDO

2

INCISION EN EL CUERO CABELLUDO

3

EXTREMO DEL CUERO CABELLUDO

DISCO DE HUESO

5

CLIP

ARTERIA CEREBRAL

6

ARTERIA DEL CUERO CABELLUDO

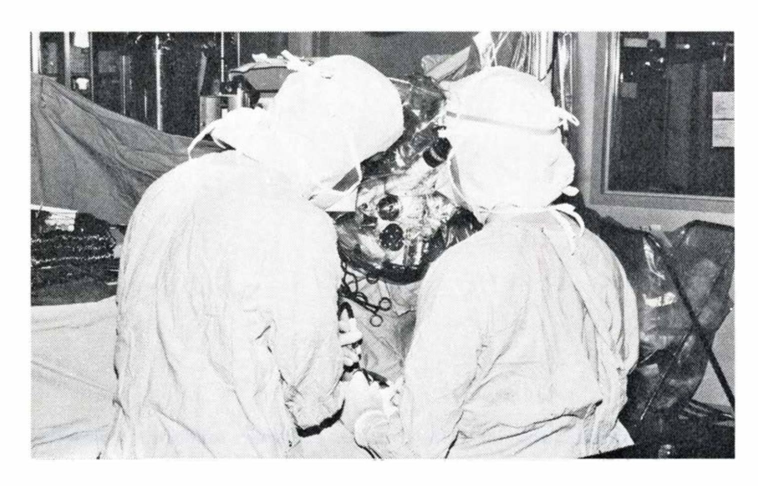
AGUJA

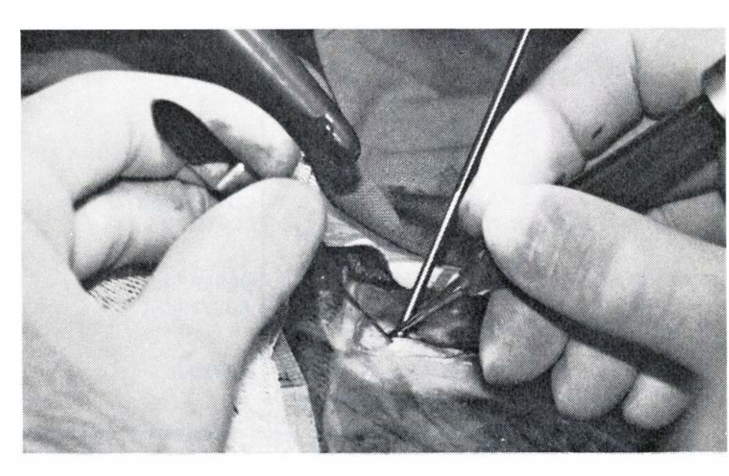
7

**OPERACION DE PONTAJE MICROVASCULAR. Consiste en conectar una arteria del cuero cabelludo a una arteria ocluida que irriga el cerebro en un punto distal a la oclusión. La intervención empieza *(1)* con incisiones del cuero cabelludo: una a lo largo de la arteria donante y otra sobre el sitio de la craneotomía, donde se va a extirpar un disco de hueso. Se diseca la arteria del cuero cabelludo de la grasa y el músculo subyacente *(2)*. Se retrae el cuero cabelludo y se extrae un disco de unos 38 milímetros de diámetro *(3)*. Se separa la duramadre y la mem-**

de la laringe en carótida externa e interna. La carótida externa, a su vez, se distribuye en una docena de ramas. Una de ellas, la arteria temporal superficial, junto con sus ramas, sigue un curso sinuoso a través del cuero cabelludo, y aporta la nutrición del cabello, de la piel y del tejido subcutáneo. Su latido se palpa a nivel de la región temporal delante de la oreja; con frecuencia está la suficientemente desarrollada como para ser visible a través de la piel.

Las arterias carótidas internas penetran en la base del cerebro. Sus ramas más importantes (la cerebral anterior, la cerebral media y las arterias comunicantes posteriores) irrigan los dos hemisferios cerebrales; sus ramificaciones más pequeñas nutren, entre otras regiones, a la retina ocular y la glándula pituitaria. Las arterias cerebrales anteriores alimentan a las partes del cerebro que están situadas cerca de la línea media y participan en los movimientos oculares, la memoria, la conciencia, la función genitourinaria y los movimientos de las piernas. La arteria cerebral media irriga el 60 por ciento central de los hemisferios cerebrales. Esta región regula los movimientos y las sensaciones (de la





**CUATRO MOMENTOS DE LA INTERVENCION. El cirujano *(sentado)* y el ayudante se hallan en la mesa de operaciones *(izquierda)*. El microscopio operatorio esta envuelto en un plástico para garantizar la asepsia. Se separa la arteria del cuero cabelludo del tejido subyacente**

4

DURAMADRE

ARACNOIDES

ARTERIA CEREBRAL

VENA CEREBRAL

8

FLUJO SANGUINEO

DURAMADRE

MEMBRANA ARACNOIDEA

CRANEO

CUERO CABELLUDO

ARTERIA DEL CUERO CABELLUDO

INCISION EN EL CUERO CABELLUDO

ANASTOMOSIS

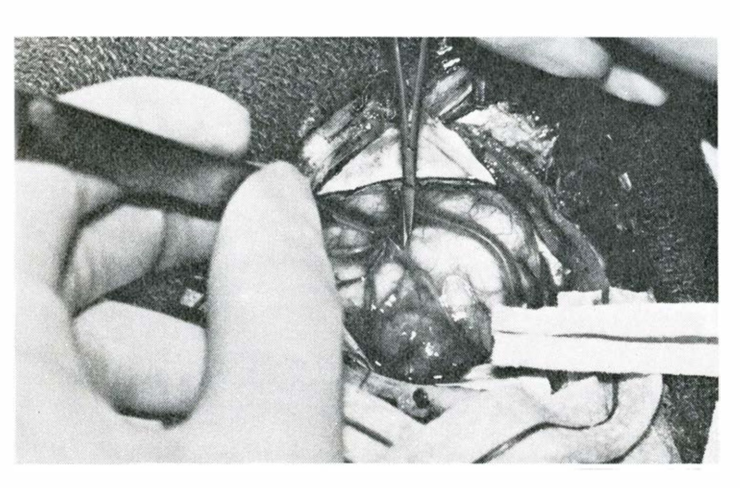
CEREBRO

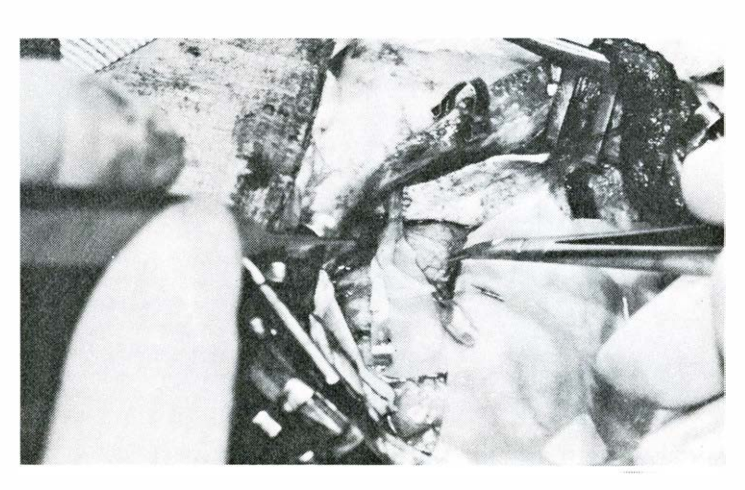
ARTERIA CEREBRAL

**brana aracnoidea más fina, para poner en evidencia los vasos sanguíneos de la parte superior del córtex** *(4)*. **Trabajando bajo el microscopio operatorio, el cirujano corta una apertura en la arteria cerebral receptora** *(5)*. **Se pasa la arteria del cuero cabelludo aislada por debajo del mismo y se coloca junto a la arteria cerebral anclándola con dos suturas** *(6)*. **Se pasan nuevas suturas a intervalos iguales** *(7)* **y a continuación se anudan** *(8)*. **El resultado final de la cirugía se muestra en el esquema mayor** *(a la derecha)*; **las flechas indican la dirección de la circulación.**

parte opuesta del cuerpo) y representa un papel importante en la recepción, interpretación y elaboración del lenguaje en el hemisferio dominante del cerebro. (El hemisferio izquierdo es dominante en la mayoría de los individuos diestros y en la mitad de los que son zurdos.) La arteria comunicante posterior y la arteria cerebral posterior, que la continúa, contribuye a la irrigación de las porciones del cerebro que participan en la recepción, interpretación y memoria de la información visual.

El tallo cerebral y el cerebelo están irrigados por ramas de las dos arterias vertebrales, que se unen para formar la arteria basilar. La arteria basilar está conectada a las dos arterias carótidas internas mediante un segmento de la arteria cerebral posterior y las cortas arterias comunicantes posteriores. Las dos arterias cerebrales anteriores están unidas por la arteria comunicante anterior. Las arterias comunicantes establecen por consiguiente el llamado círculo de Willis, que es un canal circular continuo a través del cual la sangre circula procedente de ambas carótidas y arterias basilares; ello permite que la sangre se redistribuya cuando una oclusión impor-





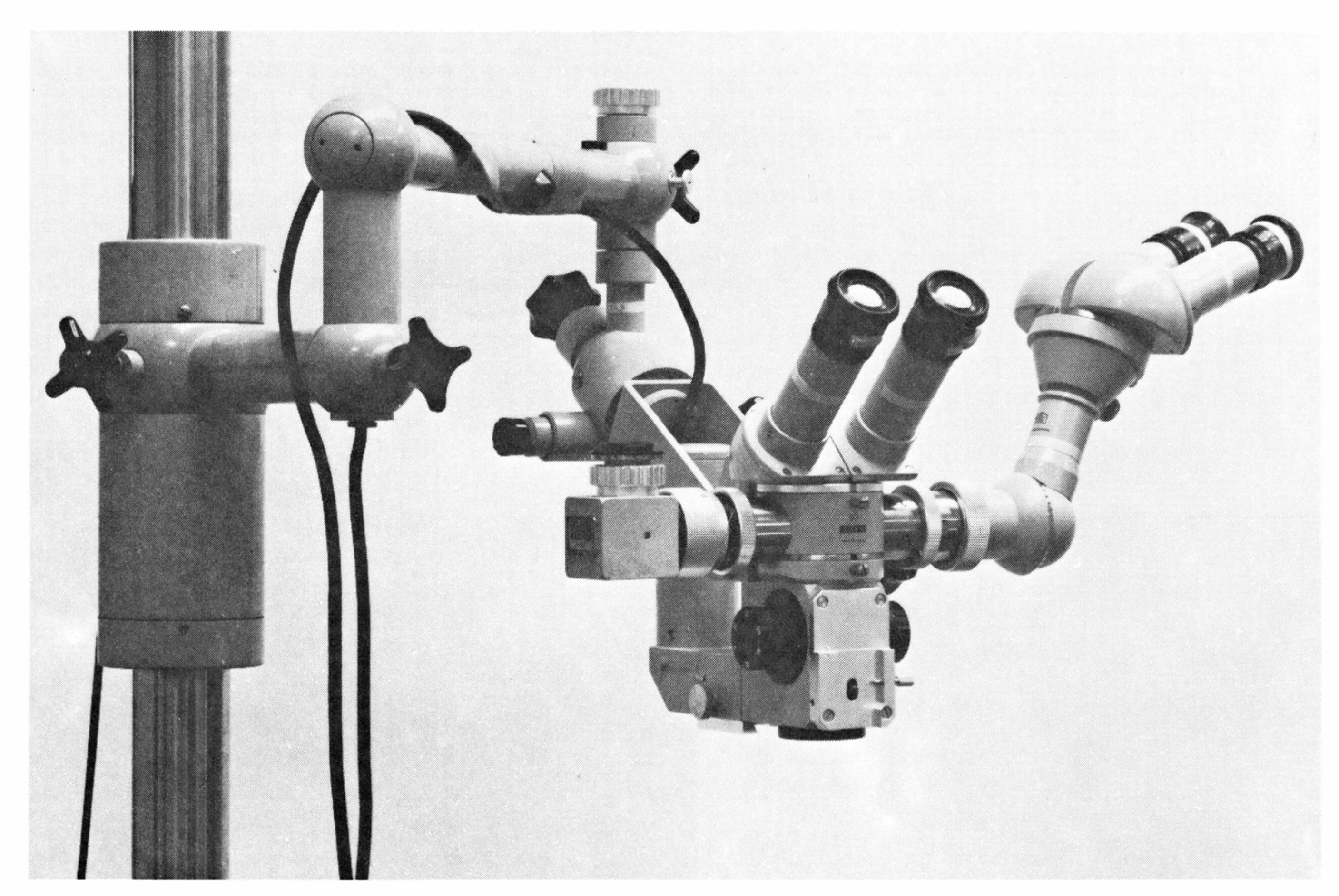
*(segunda a partir de la izquierda)*. **Con las microtijeras se abre la aracnoides para poner al descubierto la arteria cerebral receptora** *(tercera desde la izquierda)*. **Se practica la anastomosis uniendo las dos arterias con suturas que se colocan con el portamicroagujas** *(derecha)*.

tante reduce la llegada del flujo sanguíneo del corazón al círculo.

La oclusión de una arteria intracraneal importante produce, por lo general, síntomas relacionados con la parte del cerebro que se afecta, lo que permite intuir cuál sea la arteria comprometida. Pero los síntomas no pueden precisar la localización de la oclusión. Es más, las lesiones de la arteria carótida o vertebral que ocurren en su porción extracraneal pueden dar lugar a síntomas semejantes a los que producen la oclusión de una arteria intracerebral. Por consiguiente, antes de que pueda considerarse la posibilidad de cualquier tratamiento quirúrgico es necesario localizar el sitio de la oclusión. Esto puede llevarse a cabo mediante la arteriografía cerebral, que fue desarrollada originalmente en el año 1927 por el neurólogo portugués Antônio de Egas Moniz, técnica que ha sido posteriormente modificada y mejorada. Se introduce una cánula larga y flexible en la arteria femoral y se pasa hasta el cayado de la aorta. Mediante esta cánula se inyecta en ambas arterias carótidas y vertebrales un medio de contraste yodado que es opaco a los rayos X. En cada caso puede seguirse el paso de material de contraste a través del cerebro mediante la obtención de placas seriadas de rayos X. Esta tecnología se ha perfeccionado hasta el punto de que hoy es posible visualizar anormalidades importantes en arterias de 200 micras de diámetro.

La primera intervención quirúrgica que se demostró útil en el accidente cerebrovascular fue la endarteriectomía, en la que se practicaba una incisión en la arteria en el sitio de la oclusión y se extraía el coágulo responsable de la obstrucción. La primera endarteriectomía de la arteria carótida común fue llevada a cabo en el Hospital y Centro Médico Montefiore de Nueva York el 28 de enero de 1953. El coágulo se extendía demasiado en la parte distal de la arteria, por lo que no pudo extraerse completamente y sólo se consiguió un pequeño aumento del flujo sanguíneo, pero la operación permitió establecer los principios básicos del tratamiento quirúrgico de las lesiones obstructivas de la arteria carótida. La endarteriectomía es hoy un método clásico para el restablecimiento del flujo sanguíneo a través de las arterias extracraneales del cuello. Las oclusiones de las arterias carótida y vertebral pueden tratarse también mediante el ensanchamiento de la luz del segmento bloqueado con un parche o con un tubo prostético o un injerto venoso que circunde la región bloqueada ("by-pass").

A medida que los neurocirujanos iban acumulando experiencias con estos procedimientos extracraneales se puso de manifiesto que los enfermos que más se beneficiaban de este tratamiento eran los que habían sufrido un accidente cerebrovascular de poca importancia y tenían el riesgo de sufrir un accidente cerebral grave a corto plazo. Un estudio realizado en colaboración por varios centros clínicos de los Estados Unidos indicó que los enfermos con historia de un accidente cerebrovascular menor que padecían una lesión bien definida de la arteria carótida, tenían un riesgo mayor que la población general de sufrir un ictus cerebral grave y eran los que podían beneficiarse mejor de este tipo de cirugía. Este mismo estudio mostró, sin embargo, que si bien era cierto que la bifurcación de la arteria carótida común en el cuello era la localización más frecuente de las lesiones ateroscleróticas en los enfermos con ictus cerebral, su frecuencia no alcanzaba a más de la mitad de las lesiones.



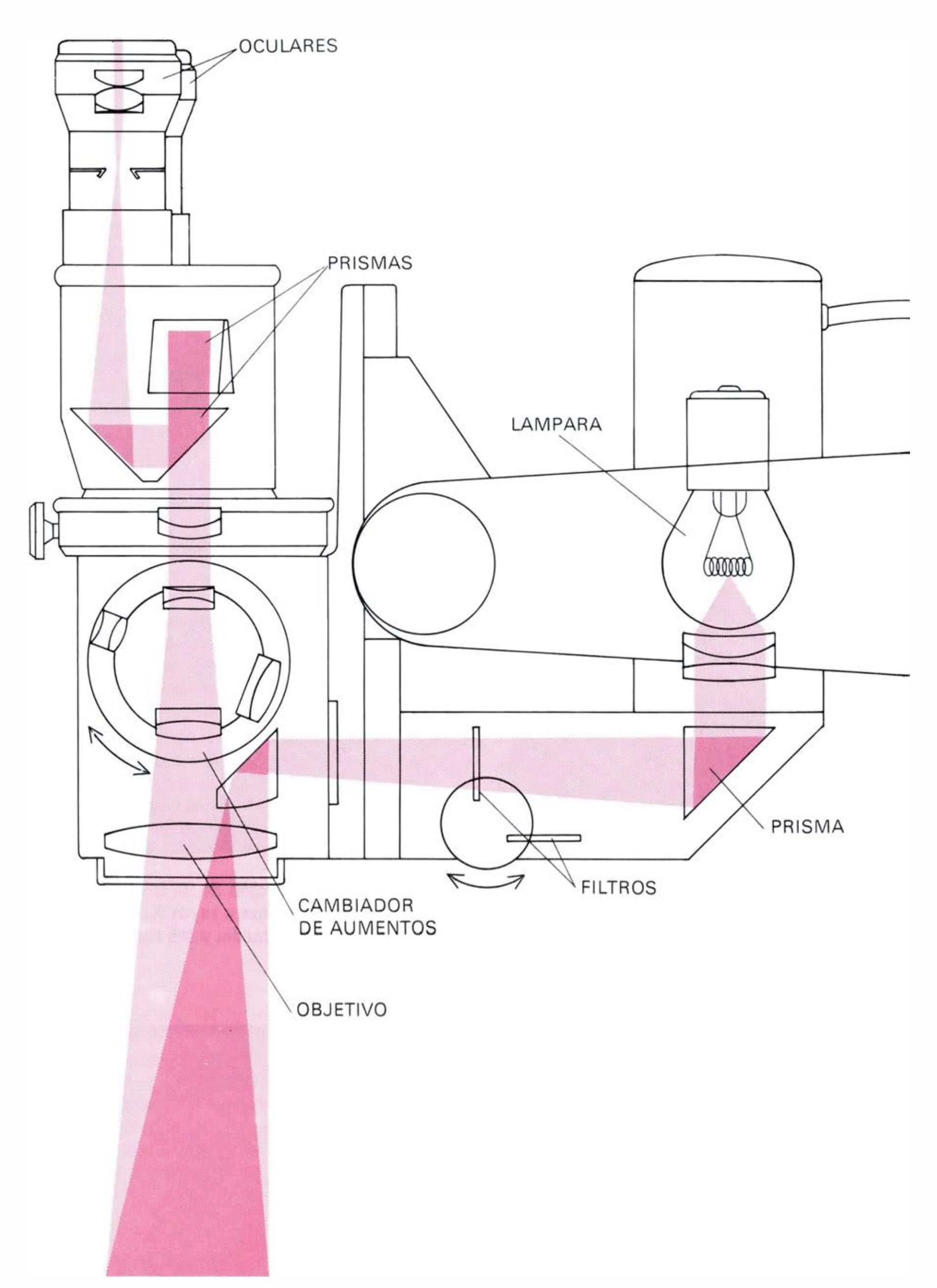
**MICROSCOPIO OPERATORIO BINOCULAR fabricado por la casa Carl Zeiss, que permite a los neurocirujanos del Albert Einstein College Hospital una visión tridimensional del campo operatorio con aumentos comprendidos entre los 6 y los 40 diámetros. Este modelo, que dispone de oculares inclinados con un ángulo de 45 grados en relación con el eje del objetivo, permite el acoplamiento de tubos adicionales a los que pueden adaptarse oculares para un ayudante, como aquí, o un dispositivo fotográfico. El microscopio se sujeta a un soporte.**

La mayoría de los pacientes con enfermedad oclusiva de las arterias cerebrales tenían lesiones obstructivas en más de una localización, que podía asentarse tanto en las arterias pequeñas del cerebro como en (o en vez de) las arterias de mayor tamaño del cuello, y los procedimientos convencionales de endarteriectomía o injerto no podían llevarse a cabo en estos pequeños vasos cerebrales.

Desde hace tiempo se ha buscado la forma de restablecer la circulación en enfermos con oclusiones intracraneales. En el año 1944 un cirujano alemán, G. Henschen, intentó la revascularización insertando un colgajo de músculo del lado de la cabeza (músculo temporal) a la superficie del cerebro, con la esperanza de que los vasos sanguíneos del músculo se conectaran a las arterias cerebrales. Según el autor, la situación del enfermo mejoró, aunque no se practicó arteriografía que documentara el resultado. En los años 50, C. Miller Fisher, de la Facultad de Medicina de Harvard, apuntó que la anastomosis, o unión, de las arterias cerebrales más allá del punto de oclusión podía ser beneficiosa en algunos casos de ictus cerebral, aunque dicha intervención escapaba a las posibilidades de las técnicas de entonces.

Poco después de que se practicara la primera endarteriectomía carotídea se llevaron a cabo ya los primeros intentos de resecar las lesiones ateroscleróticas obstructivas de las arterias intracraneales. En el año 1955, W. Keasley Welch publicó la extirpación de dos lesiones oclusivas de la arteria cerebral media mediante las técnicas convencionales. En el año 1960 dos cirujanos de la Universidad de Bolonia describieron un procedimiento mediante el cual desplazaban un pequeño émbolo de la arteria cerebral media hacia la arteria carótida interna, a través de movimientos de compresión exterior.

Sin embargo, el procedimiento de endarteriectomía de los vasos intracraneales era insatisfactorio. Los cirujanos encontraban grandes dificultades para operar en la base del cerebro, donde están situadas las lesiones, y el procedimiento se acompañaba de buen número de complicaciones. La mayor dificultad residía en el pequeño tamaño de las arterias. En aquel momento no existían técnicas para manipular y reparar los pequeños vasos de uno o dos milímetros de diámetro. Los instrumentos y el material de sutura utilizado en las arterias mayores lesionaban las arterias pequeñas, que se trombosaban. Por otra parte, el cirujano tenía que trabajar en los límites de su agudeza visual y disponía de sistemas de iluminación imperfectos para visualizar las zonas profundas del cerebro, por lo que las lesiones intracraneales llegaron a considerarse inaccesibles al tratamiento quirúrgico. El descubrimiento de una intervención de utilidad práctica debía esperar no sólo a que aparecieran nuevos conceptos sino también a que mejorara la tecnología.

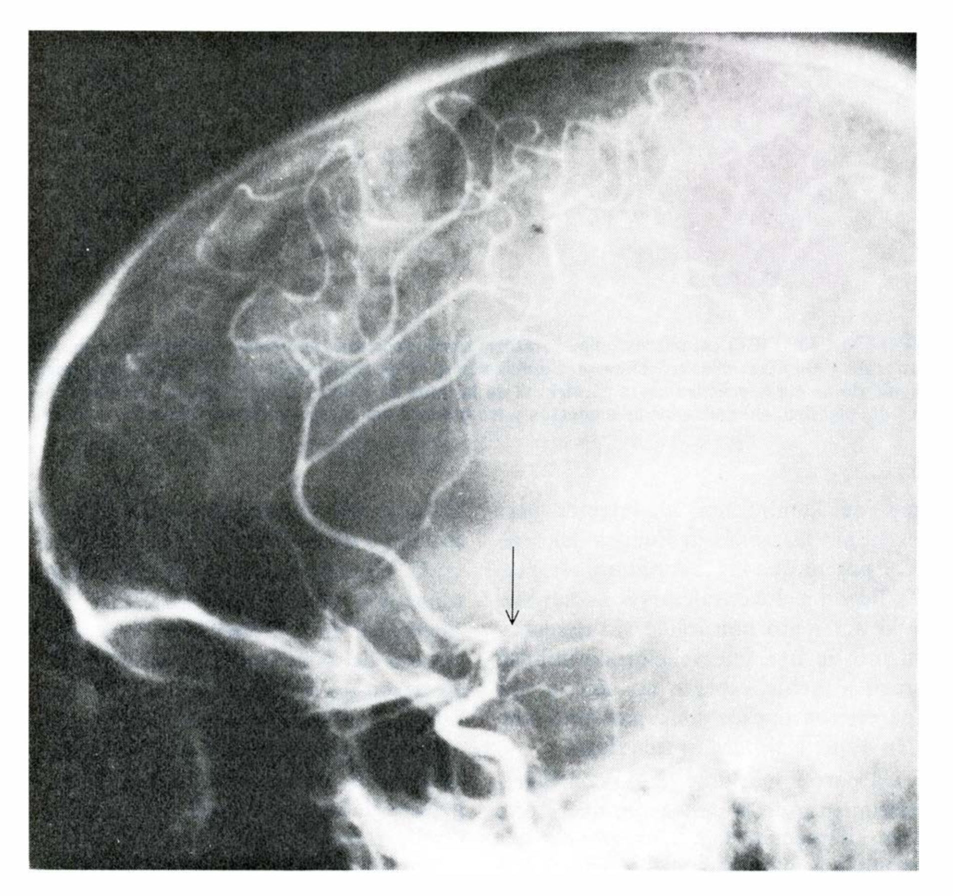



**SISTEMA OPTICO del microscopio operatorio básico fabricado por Zeiss, con un cuerpo binocular recto y sin tubo adicional. El haz de iluminación se dirige hacia abajo sobre el campo operatorio siguiendo un curso prácticamente paralelo al de la línea de visión. La luz reflejada asciende a través del objetivo, el cambiador de aumentos y los prismas del cuerpo binocular hasta los oculares.**

Un paso importante se dio con el descubrimiento del microscopio operatorio y su adaptación a la neurocirugía, que permitió la iluminación directa a través del mismo sistema óptico que amplificaba el campo operatorio. Los otorrinolaringólogos fueron los primeros en utilizar este microscopio en cirugía. Al principio de los años 20, el cirujano sueco G. Holmgren empleó un microscopio binocular, que permitía la visión tridimensional en el tratamiento de la otosclerosis del oído medio. A continuación, siguieron los oftalmólogos quienes adaptaron el microscopio para su cirugía. Y, por último, se diseñó un microscopio operatorio que se adaptaba a las exigencias de la neurocirugía. Está construido de forma que el campo operatorio se ilumine a través de la lente objetivo mediante una fuente de luz incorporada al microscopio, con lo que se eliminan las sombras que producen las estructuras



**ANGIOGRAFIA** de las arterias cerebrales obtenida mediante la inyección de un medio de constraste radioopaco, que permite seguir su curso en las distintas exposiciones a rayos X. Se distingue la ramificación de la carótida interna. Se visualizan la arteria cerebral media y sus ramas *(flecha)*.



**OCLUSION** de la arteria cerebral media en el angiograma. Se observa cómo la circulación de la sangre se interrumpe abruptamente en la oclusión *(flecha)*; se ha desarrollado cierto grado de circulación colateral, como indica la línea de trazos claros de la región posterior a la oclusión.

situadas encima del campo operatorio. Las lentes del objetivo y el ocular del microscopio producen el aumento fundamental (16 diámetros en nuestro instrumento del Albert Einstein College Hospital). Mediante un cambiado rotatorio se puede interponer encima del objetivo dos pares de sistemas refractores: un par aumenta la imagen y el otro la reduce, de forma que el cirujano puede escoger entre cuatro aumentos (entre 6, 10, 25 y 40 diámetros en nuestro caso), ajustando un dispositivo de control. Por encima del objetivo está situado un sistema que desdobla el haz y dirige la imagen a dos tubos adicionales al mismo tiempo que se transmite al tubo binocular principal. Mientras el cirujano mira a través de los oculares, un asistente puede acomodarse en el tubo suplementario, quedando el tercero para obtener fotografías o películas o transmitir por televisión. El desarrollo de la microinstrumentación en los últimos diez años ha extendido enormemente las posibilidades de manipulación del neurocirujano y de su habilidad para intervenir en vasos sanguíneos muy pequeños. Se han diseñado microtijeras y versiones en miniatura de pinzas, sondas, clips vasculares y portaagujas que pueden ser manipulados mediante pequeños movimientos de los dedos en vez de utilizar los movimientos de las manos y de la muñeca. Disponemos en la actualidad de material de microsutura de nilón de 20 micras de diámetro, la cuarta o quinta parte del grosor de un cabello humano, con lo que el cirujano puede suturar arterias y venas de 1 milímetro de diámetro.

A finales de los años 60, M. Gazi Yazargil, del Hospital Cantonal de Zurich, fue el primer cirujano que anastomosó una arteria del cuero cabelludo con una rama de la cerebral media en la superficie de la corteza cerebral. Quedaba por ver, sin embargo, si dicho procedimiento podía aumentar la circulación cerebral y justificar el esfuerzo del cirujano. A principios del año 1972 un grupo del National Naval Medical Center estadounidense pudo simular un accidente cerebrovascular oclusivo en perros y tratar esta situación mediante la anastomosis de una arteria temporal superficial con una rama cortical de la arteria cerebral media. El aumento de la circulación y la mejoría de la función cerebral producida por el by-pass sugería que el procedimiento podía aportar sangre en cantidad suficiente al cerebro para prevenir el desarrollo del ictus cerebral en enfermos humanos susceptibles. En el año 1975 otro grupo, a la sazón en el

Albert Einstein College of Medicine, y los cirujanos de otras instituciones médicas estaban ya realizando pontajes ("by-pass") en pacientes seleccionados.

El objetivo primordial de la cirugía de los accidentes cerebrovasculares es la prevención del ictus. Los mejores candidatos para el procedimiento del pontaje ("by-pass") microvascular serán, por consiguiente, aquellos enfermos que encierren un mayor riesgo de sufrir un accidente cerebral a causa de las lesiones ateroscleróticas. En efecto, la operación puede salvar lesiones obstructivas de la carótida interna, de la cerebral media o de las arterias vertebrales. En la mayoría de los enfermos, la progresión de la enfermedad es escalonada, antes de que aparezca el accidente grave incapacitante. El interrogatorio cuidadoso del enfermo o de sus familiares demuestra que, en más del 75 por ciento de los casos, el accidente cerebral grave fue precedido de episodios transitorios de irrigación vascular cerebral insuficiente. Estos accidentes isquémicos transitorios, o ictus premonitorios, duran de varios minutos a 24 horas, y van seguidos de un retorno gradual del flujo sanguíneo a la normalidad con resolución del déficit neurológico.

Algunos enfermos presentan sólo unas pocas crisis antes del accidente grave; otros llegan a tener más de una docena al día. La sintomatología depende de la parte del cerebro afectada. Puede parecer debilidad, acorchamiento o pesadez en un lado del cuerpo, dificultad en hablar o escribir, debilidad en ambas piernas, ceguera o mareo transitorios. Todavía no se ha esclarecido si la reducción del flujo sanguíneo está producida directamente por un trombo que obstruya la arteria carotídea o por una masa de plaquetas que se desprendan del trombo formando un émbolo que ocluya temporalmente un vaso más pequeño. En el caso de la ceguera temporal, conocida con el nombre de amaurosis fugaz, hay pruebas de que los émbolos plaquetarios, que se originan en las placas de la arteria carotídea, circulan a través de la arteria oftálmica hasta las arterias de la retina. Estos émbolos se han observado mediante el oftalmoscopio en las arterias de la retina (las únicas arterias que pueden visualizarse directamente) durante un ataque.

Tanto los estudios prospectivos de enfermos que han sufrido una crisis isquémica transitoria como los retrospectivos en enfermos con ictus cerebral indican que las personas que han padecido aunque sólo sea un accidente transitorio tienen 10 veces más probabilidades de sufrir un accidente cerebral que los individuos de la población normal. Evidentemente, son posibles candidatos para la cirugía del pontaje ("bypass") microvascular. Deben mencionarse otras tres categorías de candidatos potenciales. Existen enfermos que sufren una versión más severa de la crisis isquémica transitoria: presentan un déficit neurológico isquémico reversible cuyos síntomas persisten durante más de 24 horas, aunque no dejan secuelas permanentes del daño cerebral. Hay otro grupo de enfermos que sufren una demencia progresiva (llamada comúnmente demencia senil, si bien se observa con frecuencia en la edad media de la vida) causada por un aporte circulatorio insuficiente al cerebro. Por último, hay enfermos que han tenido un accidente cerebrovascular que les deja sólo parcialmente incapacitados.



**TOMOGRAFIA COMPUTARIZADA (TC), que demuestra la extensión del daño cerebral, elemento importante en la selección de candidatos para la cirugía del ictus. La TC se elabora mediante un análisis por ordenador de la atenuación de series de haces radiográficos, registrados a medida que el foco y el detector se desplazan alrededor de la cabeza. El sistema ventricular se muestra como una imagen densa en forma de alas de mariposa. Las áreas densas de la derecha y la izquierda indican la presencia de tejido dañado por la falta de riego sanguíneo adecuado.**

La cirugía de by-pass puede estar indicada en enfermos cuya historia clínica y examen físico demuestra que forman parte de una de las cuatro categorías descritas, con la condición de que su estado tenga todavía mucho que perder en caso de que se presente el accidente cerebral y de que la lesión se localice en un punto favorable. La tomografía computerizada (CT) es una técnica radiológica que se aplica al estudio de tejidos blandos, y puede facilitar el reconocimiento de la extensión del daño cerebral permanente; el daño extenso es una contraindicación relativa de la intervención. El electroencefalograma, la gammagrafía isotópica del cerebro y el examen de líquido encefalorraquídeo ayudan al cirujano a descartar los casos en que no existe una insuficiencia vascular (tumores cerebrales, por ejemplo). Finalmente, es necesario confirmar mediante arteriografía que el problema clínico está causado por la lesión obstructiva y hace falta determinar con precisión el lugar de la lesión.

Se coloca bajo anestesia general al paciente seleccionado para la intervención en la mesa de operaciones y se le fija la cabeza rígidamente mediante un dispositivo especial. Se escoge, mediante palpación a través de la piel afeitada, una arteria del cuero cabelludo de tamaño suficiente y en el lugar adecuado que sirva como vaso donador, y se practica

una incisión a lo largo de dicha arteria. (Dado que la arteria del cuero cabelludo irriga una región determinada del mismo, la diversión de su flujo al cerebro puede empeorar el aporte sanguíneo de la piel, pero ésta tiene una circulación colateral suficiente de forma que no se produce ninguna alteración permanente o seria.) La arteria del cuero cabelludo se libera de la piel y se abre el músculo subyacente, exponiéndose el hueso del cráneo. Mediante una sierra cilíndrica, llamada trefina, se secciona y se separa un disco de 4 centímetros de hueso del cráneo. Se abre a continuación la duramadre, la membrana protectora que cubre el cerebro, y se expone el corte cerebral, las arterias y las venas de su superficie.

Se examina la superficie de la corteza a través del microscopio operatorio y se escoge como vaso receptor del injerto una arteria apropiada, que suele ser la rama angular de la arteria femoral media. Se diseca y se libera de tejidos subcutáneos a la arteria donante del cuero cabelludo, se ligan sus ramas y se interrumpe la circulación mediante un pequeño clip atraumático. Se corta la arteria y se moviliza un trozo de la misma para el pontaje. Trabajando con el microscopio operatorio a aumentos de 16 o 25 diámetros, el cirujano prepara a continuación el extremo de la arteria donante, cortándola diagonalmente para hacer una apertura oval que maximice el área de la anastomosis. Se colocan microclips atraumáticos en la arteria cortical para interrumpir el flujo sanguíneo temporalmente y se hace una apertura oval en uno de sus lados, vaciándose el segmento de arteria que queda entre los clips; se coloca en el vaso un tubo blando de teflon con el fin de mantener la luz abierta y facilitar la sutura. Se incrementa la amplificación del microscopio (25-40 diámetros), y se lleva el extremo de la arteria del cuero cabelludo en contacto con la abertura lateral de la arteria cortical y se suturan los dos vasos mediante 18 a 24 microsuturas cuidadosas.

Cuando se ha completado la anastomosis y se han quitado los clips temporales de las arterias donante y recipiente, se produce un aumento inmediato del flujo sanguíneo al cerebro que alcanza los 100 centímetros cúbicos por minuto, que equivalen a la tercera parte o a la mitad del flujo normal a través de la carótida interna. Algunos cirujanos han estimado que el flujo a través del injerto puede llegar, en algunos casos, a los 200 centímetros cúbicos por minuto. Este aumento de la circulación puede observarse a veces a simple vista en una

arteria temporal superficial. El cerebro necesita más sangre que el cuero cabelludo, de manera que el diámetro de la arteria que nutre al cuero cabelludo se agranda cuando su flujo se desvía hacia el cerebro. El flujo sanguíneo varía según la cuarta potencia del radio del vaso, por lo que parece probable que la anastomosis sea suficiente para nutrir la mayoría del territorio del hemisferio cerebral. Es evidente que esta nueva técnica puede introducir un cambio muy importante en los enfermos cuyo flujo sanguíneo cerebral esté bordeando el déficit y por consiguiente cerca de los límites del sufrimiento cerebral.

Los resultados de la cirugía microvascular han sido muy satisfactorios y los riesgos del enfermo parecen ser mínimos. Se ha demostrado que en ausencia del tratamiento, el 50 por ciento de los enfermos comprendidos en el grupo de riesgo elevado a partir del cual se seleccionan los candidatos a la cirugía de by-pass van a sufrir un accidente cerebrovascular en un plazo de tres años y medio. En el Segundo Symposium Internacional sobre Anastomosis Microvascular, celebrado en el año 1974, se revisaron 400 enfermos sometidos a dicha intervención, vigilados durante un lapso de tiempo de dos años y medio, por término medio. Sólo tres habían sufrido un ictus cerebral. Se observó una reducción significativa en la frecuencia de los accidentes isquémicos transitorios en todos los enfermos que los habían sufrido previamente, y en la mayoría de los enfermos se eliminaron por completo. En un grupo de 30 enfermos operados por nuestro grupo del Albert Einstein College Hospital, sólo uno sufrió un accidente cerebrovascular, y fue debido a la interrupción repentina de la circulación a consecuencia de una embolia pulmonar un mes después de la intervención. No se produjo ningún fallecimiento relacionado con la intervención (es decir, durante los 30 días inmediatos a la intervención).

El impacto del ictus cerebral en la vida del enfermo y sus familiares es evidente. El coste económico del ictus cerebral en Estados Unidos, en el año 1972, fue estimado en 6200 millones de dólares, en los que van incluidos los gastos directos por asistencia médica y rehabilitación y los costos indirectos que derivan de lo que deja de ganar el enfermo por incapacidad y muerte prematura. Parece razonable esperar que la cirugía microvascular y las innovaciones que conlleva puedan reducir el coste económico, social y personal de esa temible enfermedad.

# Chimeneas de kimberlita

*Estos singulares volcanes fósiles ascienden desde zonas muy profundas. Constituyen la fuente esencial de diamantes y de rocas que seguramente son muestras procedentes del manto terrestre*

Keith G. Cox

La vida de los geólogos transcurre en la superficie de la tierra; ello explica que su conocimiento directo del interior del planeta sea escaso. De las tres grandes envolturas que constituyen la estructura terrestre, corteza, manto y núcleo, sólo la primera es accesible e, incluso en las regiones donde su espesor resulta máximo, representa aproximadamente el uno por ciento del radio de la tierra. Determinados caracteres físicos de las capas más profundas, como su densidad media y la velocidad a que en ellas se transmiten las ondas sísmicas, pueden deducirse desde la superficie. No existe, sin embargo, ningún sustituto adecuado que pueda suplir a un ejemplar procedente del manto al estudiar la composición química.

Una fuente extraordinaria de muestras de este tipo son ciertas rocas, poco frecuentes, que reciben el nombre de kimberlitas. Las formaciones de kimberlita suelen disponerse a modo de pequeños pozos verticales, denominados chimeneas, que nos demuestran su origen volcánico. Se han estudiado ampliamente esas chimeneas, debido en gran parte a su importancia económica: constituyen la fuente última de diamantes naturales. Pero las chimeneas de kimberlita suministran al geólogo gemas de un tipo distinto: rocas procedentes de gran profundidad. Puede que algunas de estas rocas sean muestras de materiales que caracterizan las partes superiores del manto terrestre.

Hasta hace unos 100 años, los únicos yacimientos de diamantes conocidos se encontraban en graveras fluviales. En 1870, sin embargo, se siguió la pista de los yacimientos aluviales de diamantes de Africa del Sur que conducía hasta sus orígenes, a saber: las chimeneas de kimberlita de Jagersfontein y Dutoitspan. Las chimeneas se hallaban cerca de un poblado que hoy se ha convertido en la ciudad sudafricana de Kimberley, cuyo nombre se utilizó para denominar el tipo de roca en donde se observaron los diamantes.

Se han descubierto otras varias chimeneas en Kimberley desde entonces; asimismo, se han encontrado, diseminadas por el cono sur africano, chimeneas aisladas o formando grupos pequeños. Existe un conjunto de 17 chimeneas en Lesoto, minúsculo país rodeado enteramente por Africa del Sur, y se conocen otros en Botswana, Namibia, Angola y, más hacia el norte, en Tanzania. Los únicos yacimientos de kimberlita que puedan parangonárseles, en otras partes del mundo, se localizan en la república de Yakutsk (Siberia), donde fueron descubiertos no hace mucho (1954). En América del Norte se hallan concentrados a lo largo de la frontera que limita los estados de Colorado y Wyoming; se han registrado algunos en Montana y en la zona ártica de Canadá. La mayoría de las chimeneas de kimberlita americanas son pequeñas o carecen de importancia económica; sólo una de ellas, la ubicada en Murfreesboro (Arkansas), se explotó durante breve tiempo como mina de diamantes.

Comparados con los restos más frecuentes de actividad volcánica existentes en la superficie terrestre, las chimeneas de kimberlita no dejan de ser elementos insignificantes. Las de mayores dimensiones tienen diámetros, en superficie, de menos de dos kilómetros, y muchas de las reconocidas como importantes desde el punto de vista económico poseen diámetros de escasos centenares de metros. Las chimeneas tienen generalmente la forma de un cilindro o de un cono estrecho, cuyo diámetro se va reduciendo poco a poco con la profundidad. En las proximidades de las chimeneas, la kimberlita puede encontrarse integrando las formaciones asociadas denominadas diques; éstos son intercalaciones laminares, verticales, originadas por la intrusión de material fundido en las fisuras de las rocas circundantes. Las chimeneas hicieron erupción probablemente en superficie cuando se formaron, manifestándose entonces mediante un cráter abierto y un pequeño cono de materiales de expulsión. Sin embargo, en casi todos los casos, la erosión posterior ha barrido los rasgos superficiales y los niveles superiores tanto de la kimberlita como de las rocas circundantes. Las chimeneas que, por su posición, pueden estudiarse hoy en día afloran en niveles de erosión más profundos.

Los diamantes se separan de la kimberlita gracias a la erosión, depositándose generalmente en niveles fluviales. Cambios geológicos posteriores pueden enterrar y consolidar estos sedimentos aluviales, pero los diamantes, por ser minerales extremadamente resistentes, permanecen inalterados. La mayoría de chimeneas de kimberlita conocidas se emplazaron durante el período cretácico (hace entre 70 y 130 millones de años, aproximadamente). Sin embargo, los diamantes se encuentran en sedimentos de varias edades geológicas, lo que pone de manifiesto que también existían chimeneas en períodos anteriores. Por ejemplo, Brasil cuenta con extensos yacimientos diamantíferos aluviales que no están asociados a kimberlitas conocidas. Seguramente, las chimeneas más antiguas se hallan ocultadas hoy por formaciones suprayacentes más modernas. No deja de ser curioso que una de las chimeneas de mayores dimensiones de Africa del Sur, la Premier, tenga una edad superior a 1150 millones de años, y sea, por tanto, mucho más antigua que las típicas chimeneas cretácicas de la región.

La kimberlita es un tipo de roca muy variable. La mayoría de las que afloran en superficie, que constituyen el llamado "suelo amarillo" por mineros y prospectores, están muy meteorizadas. A niveles más profundos existe un material mejor conservado que se denomina "suelo azul", pero hasta hace poco no se ha podido disponer fácilmente de muestras de kimberlita nativa. La kimberlita fresca es una roca dura, de color gris obscuro o azulado, cuya estructura demuestra sin lugar a dudas un origen ígneo. La kimberlita fue extruida hasta su posición actual en forma de líquido fundido, en-

friándose luego por contacto con el conducto volcánico y solidificándose finalmente.

Los principales constituyentes de la kimberlita son silicatos, es decir, compuestos de silicio y oxígeno con iones metálicos. En general, los minerales no pueden definirse como simples compuestos químicos porque su composición no está determinada por una relación fija de átomos. A menudo se encuentran dos o más compuestos, en cuyo caso se dice que forman una solución sólida entre ellos. Al igual que en una solución líquida, las substancias componentes pueden mezclarse en cualquier proporción a lo largo de un amplio intervalo de composición para cada una de ellas. Un constituyente importante de la kimberlita es el mineral denominado olivino, solución sólida de silicato de magnesio ($Mg_2SiO_4$) y silicato de hierro ($Fe_2SiO_4$). Otro silicato presente es la flogopita, mica rica en potasio y magnesio, y existen igualmente diversos minerales silicatados clasificados como serpentinas. Estas se forman por hidratación del olivino, o, en otras palabras, por adición química de agua a este mineral. La kimberlita contiene también el mineral calcita, que no es un silicato sino que está formado por carbonato cálcico ($CaCO_3$) más o menos puro.

De los materiales que se encuentran en las chimeneas de kimberlita, la roca de este nombre puede ser menos interesante que alguno de los cuerpos extraños que aparecen en forma de inclusiones dentro de la matriz de la misma. Entre estas inclusiones figuran naturalmente los diamantes, gracias a los cuales, sobre todo, conocemos adecuadamente estos notables volcanes. Sin los incentivos económicos que se derivan de la investigación y explotación minera de los diamantes, apenas si dispondríamos de



**CHIMENEA DE KIMBERLITA en Africa del Sur intensamente excavada a través de labores mineras realizadas a cielo abierto. La propia kimberlita ha sido extraída hasta una profundidad de unos cuantos centenares de metros; la forma del yacimiento original se pone de manifiesto por el tamaño y forma de la cavidad. Comparadas con los tipos de volcanes más frecuentes, las chimeneas kimberlíticas son estructuras geológicas de dimensiones muy reducidas, comprendidas generalmente entre unos cuantos centenares de metros y los dos kilómetros de diámetro. Pero si consideramos su dimensión vertical, estos estrechos pozos atraviesan la corteza terrestre y llegan al manto superior, pudiendo haber transportado rocas desde esta última región hasta la superficie. La chimenea de la fotografía es la Premier, cerca de Johannesburgo.**

las debidas muestras de kimberlita para su análisis.

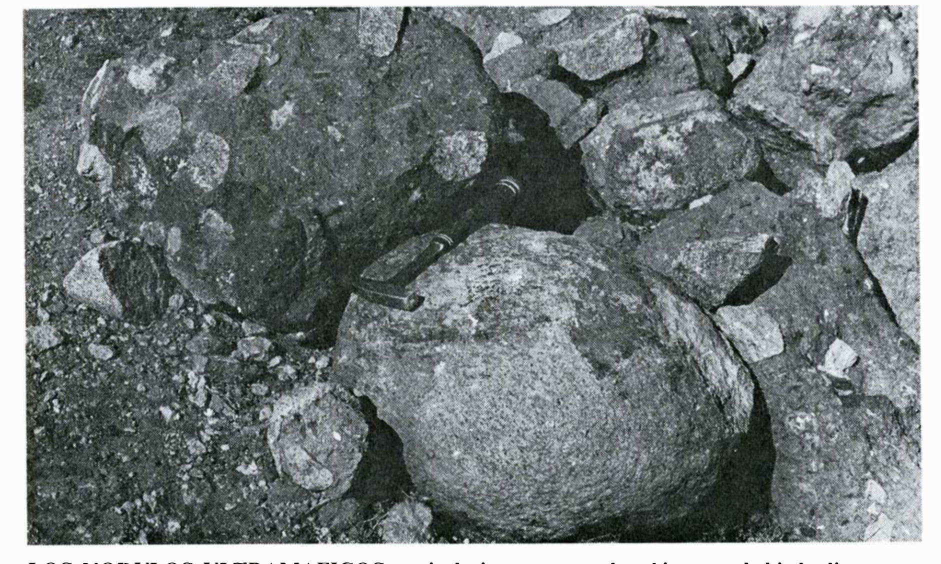
Otro tipo de inclusión que se encuentra en ellas, mucho más frecuente que los diamantes, son las rocas arrancadas de las paredes de la chimenea volcánica. En cuanto la kimberlita fundida se acerca a la superficie, con la consiguiente disminución de la presión que en ella existe, los gases disueltos en la roca (sobre todo, vapor de agua y dióxido de carbono) son expulsados de la solución. A consecuencia de ello, el volcán tiene una erupción de tipo explosivo. Las paredes del conducto sufren una abrasión que se intensifica cerca de la superficie, de suerte que la chimenea se ensancha cerca de la boca de salida. Parte de las rocas que integran las paredes salen probablemente expulsadas durante la erupción, pero otra parte mayor de las mismas queda fragmentada, molida e incorporada a la kimberlita. Estas inclusiones reciben el nombre de xenolitos (del griego, rocas extrañas).

Al derivar los xenolitos de rocas observables en los terrenos circundantes a la chimenea, podemos determinar su profundidad de origen. Muchos de ellos cayeron por la chimenea encontrándose ahora a centenares de metros por debajo de sus equivalentes en las paredes de la misma. Los xenolitos que se hallan en derivaciones cegadas de la chimenea (es decir, en conductos que no llegaron a alcanzar la superficie) indican que algunos fragmentos descendieron y luego se vieron arrastrados hacia arriba de nuevo.

Quizás el máximo interés científico de las kimberlitas proceda de un tercer tipo de inclusión: las rocas denominadas nódulos ultramáficos. Como los diamantes, se trata de nódulos raros; y, al igual que ellos, se supone que proceden también de grandes profundidades, tal vez del orden de 250 kilómetros por debajo de la superficie. Tienen una forma característica redondeada.

Constituye una cuestión importante saber por qué los nódulos ultramáficos se localizan en las chimeneas de kimberlita cuando no existen casi nunca en otros volcanes, algunos de los cuales pueden originarse asimismo en zonas profundas dentro del manto. Según una hipótesis, las kimberlitas ascienden a través de la tierra mucho más de prisa que los magmas de otros volcanes. Si la roca fluida se comportara igual que un líquido ordinario, como el agua, entonces se requeriría un ascenso rápido para transportar los nódulos mayores. Se dice que tales líquidos tienen una resistencia a la cizalla de valor cero: una parte del fluido se puede mover libremente en relación a otra parte del mismo. De ahí que un cuerpo sólido inmerso en el fluido pueda ser arrastrado hacia arriba sólo si la fuerza de arrastre creada por el fluido en movimiento sobrepasa el peso del nódulo. Los cálculos basados en el peso de los nódulos mayores permiten deducir que pueden haber ascendido a la superficie en un período de horas o, todo lo más, de unos pocos días.

Acaba de formularse una hipótesis alternativa a esta del ascenso rápido. En opinión de R. S. J. Sparks, H. Pinkerton y R. MacDonald, de la Universidad de Manchester, cabe la posibilidad de que los silicatos fundidos, bajo determinadas circunstancias, no se comporten como fluidos ordinarios, es decir, puedan tener una resistencia a la cizalla mayor de cero. Los nódulos ultramáficos podrían ser transportados entonces no por la fuerza de arrastre sino en forma de inclusiones fijas en la matriz del fluido. Una propiedad peculiar de estos fluidos es que conservan su resistencia a la cizalla sólo cuando fluyen a velocidad baja y, por tanto, la otra posibilidad que queda frente a un ascenso rápido es un ascenso excepcionalmente lento.



**LOS NODULOS ULTRAMAFICOS son inclusiones raras en las chimeneas de kimberlita, transportados, según parece, en estado sólido desde el manto superior. Algunos nódulos de pequeño tamaño y fracturados están rodeados por la matriz kimberlítica de la roca *(izquierda)*. El bloque redondeado del centro es un nódulo de gran tamaño. Las formas redondeadas y suaves, características de los nódulos, se producen por abrasión durante su transporte. El término "ultramáfico" se aplica a las rocas constituidas principalmente por silicatos de magnesio y hierro. La clase más frecuente de nódulos, que incluye los que se observan en la fotografía, está compuesta por el tipo de roca denominada peridotita, considerada como uno de los principales constituyentes del manto.**

Las condiciones físicas existentes en el interior de la tierra y determinadas propiedades físicas de los materiales allí encontrados pueden deducirse a partir de medidas hechas en superficie. Por ejemplo, puesto que la masa y el momento angular de la tierra son conocidos, se puede calcular la distribución de la densidad. A partir de esta información, se puede determinar la presión interna en función de la profundidad. Se supone que la presión es hidrostática, o, en otras palabras, que se ejerce igualmente en todas direcciones por un material que de por sí no es compresible. Se puede demostrar entonces que la presión aumenta aproximadamente un kilobar, es decir, 1000 veces la presión atmosférica al nivel del mar, por cada tres kilómetros de profundidad. Se pueden calcular las temperaturas internas midiendo el flujo de calor cerca de la superficie. La temperatura aumenta con la profundidad en todas partes, si bien el incremento es más lento bajo los continentes que bajo el fondo oceánico.

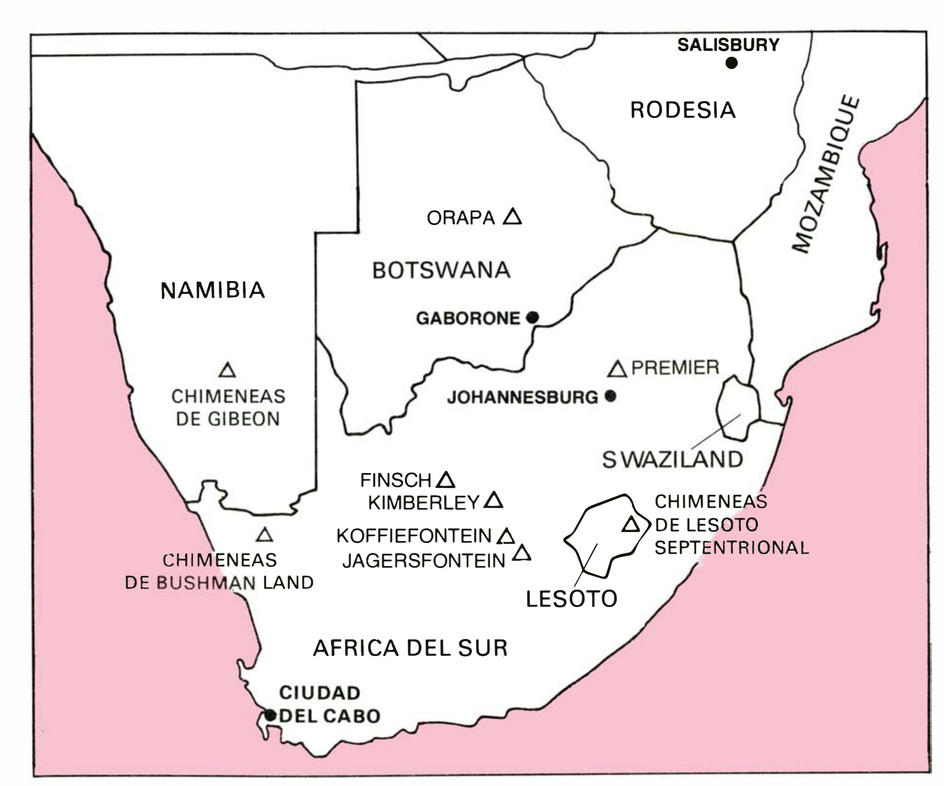
El esquema más revelador del interior de la tierra procede de la observación de las ondas sísmicas que se han propagado a grandes distancias. La refracción de estas ondas a diversas profundidades revela cambios bruscos en su velocidad. Estos cambios pueden corresponder a discontinuidades que afecten igualmente a otras propiedades.

La división de la tierra en corteza, manto y núcleo se basa en este tipo de observaciones sísmicas. La corteza tiene un espesor de unos 10 kilómetros bajo los océanos, variando este valor entre los 35 y 70 kilómetros bajo los continentes. El manto se extiende desde la base de la corteza hasta una profundidad de unos 2900 kilómetros y el núcleo llega hasta el centro de la tierra, a una profundidad de 6370 kilómetros. El manto puede dividirse, además, en manto superior y manto inferior estando el límite a una profundidad de unos 700 kilómetros.

Las observaciones sísmicas han puesto de manifiesto otra discontinuidad dentro del manto superior que sirve de base a una interpretación independiente y complementaria de la estructura de la tierra. El material que se encuentra por encima de esta región, que abarca toda la corteza y una parte del manto superior, es la litosfera. Está formada por placas rígidas, varias de las cuales tienen movimientos relativos entre sí. La litosfera limita en su parte inferior con la astenosfera, que se caracteriza por su baja viscosidad y puede estar sujeta a fusión parcial. Las placas de la litosfera están encima de la astenosfera, más fluida en comparación, y se mueven sobre ella.

Algunas de las discontinuidades físicas deducidas de las observaciones sísmicas corresponden seguramente a límites de composición química. En la corteza continental, los constituyentes dominantes son los granitos y rocas afines. Ricos en silicio, aluminio, sodio y potasio, se muestran pobres, en comparación, en magnesio y hierro. La corteza oceánica esta formada, sobre todo, por basalto; en relación con el granito, éste posee más magnesio y hierro, pero menos sodio y potasio. Existen láminas de corteza oceánica que ocasionalmente han sufrido corrimientos a raíz de producirse colisiones entre placas litosféricas. De un modo mucho más esporádico, estas láminas de corteza oceánica llevan consigo una porción del material perteneciente a la parte superior del manto (unos cuantos kilómetros). Las rocas del manto, que afloran gracias a estas placas cabalgantes, son predominantemente del tipo denominado peridotita. Tales rocas tienen una composición próxima a la inversa de la que presentan los granitos de la corteza continental: son muy ricas en magnesio, pero están ligeramente empobrecidas en silicio y considerablemente empobrecidas en aluminio, sodio y potasio.

La mejor información de que se dispone respecto a la composición de la tierra en conjunto no procede de las rocas terrestres, sino de los meteoritos. Los meteoritos más primitivos, los condritos, tienen una textura vesicular poco corriente. Se cree que son elementos no alterados constitutivos del material a partir del cual se condensó el sistema solar. Los condritos están formados por una roca silicatada, parecida a la peridotita en cuanto a composición global se refiere, y por hierro metálico que contiene una cantidad substancial de níquel en solución. Si las composiciones medias de los condritos y de la tierra son similares, entonces el manto debe estar constituido principalmente de peridotita y, el




**ABUNDAN MAS CHIMENEAS DE KIMBERLITA en Africa meridional que en cualquier otra parte del mundo. En la mayoría de lugares que aquí se indican no se encuentran sólo chimeneas aisladas sino un conjunto de ellas. Así, por ejemplo, el grupo de Lesoto septentrional comprende 17 chimeneas. La única concentración de chimeneas comparable con la que existe en Africa meridional se halla en Siberia. Quizá sea significativo el que tanto Africa del Sur como Siberia fueran zonas donde se produjo una actividad volcánica generalizada antes de formarse las chimeneas.**

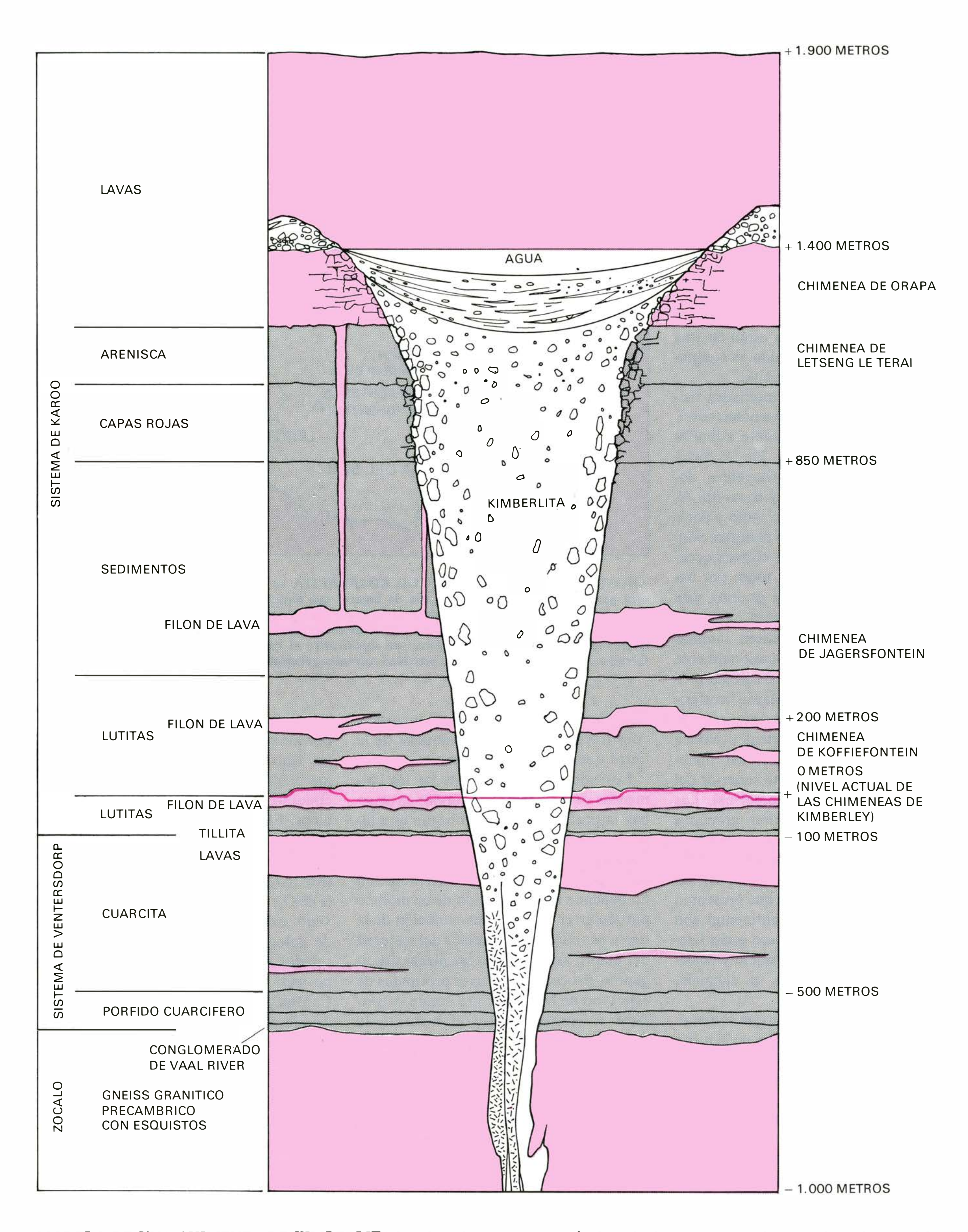
núcleo, de hierro y níquel. (La corteza constituye una parte tan pequeña de la tierra que puede despreciarse.)

Los nódulos ultramáficos de las chimeneas de kimberlita proporcionan pruebas importantes que corroboran esta hipótesis. A diferencia de los meteoritos, se trata de verdaderas muestras de material terrestre y, por tanto, su interpretación no depende de la adopción de un modelo particular en cuanto a la evolución de la tierra se refiere. A diferencia del material del manto asociado con las placas cabalgantes, proceden de partes profundas de éste y no de la zona límite donde se produce el contacto entre el manto y la corteza.

"Máfico" es un término aplicado a los minerales que contienen cantidades elevadas de silicatos de magnesio y hierro, siendo en las rocas ultramáficas donde estos minerales resultan los componentes principales. La mayoría de los nódulos ultramáficos encontrados en las kimberlitas están formados por peridotita, la cual, a su vez, está compuesta sobre todo por olivino y por otro silicato, el minerai llamado piroxeno.

El olivino de las peridotitas es rico en magnesio; así, en su composición, el $Mg_2SiO_4$ domina sobre el $Fe_2SiO_4$. Los nódulos contienen dos clases de piroxeno que pueden diferenciarse, no sólo por su composición, sino también por los sistemas de simetría de sus cristales. Uno de ellos es un ortopiroxeno y forma cristales ortorrómbicos; el otro es un clinopiroxeno y forma cristales monoclínicos. El ortopiroxeno, que es el mineral más abundante después del olivino, está constituido por silicato de magnesio ($MgSiO_3$) con algo de silicato de hierro ($FeSiO_3$) en solución sólida. El clinopiroxeno es un diópsido crómico, mineral de color verde brillante que posee cantidades substanciales de calcio. Su composición elemental es, aproximadamente, $CaMgSi_2O_6$, pero también contiene algo de hierro y cromo. Muchas peridotitas llevan también pequeñas cantidades de piropo, variedad del granate cuyo color varía entre el rojo y el violeta. La composición aproximadamente, del piropo es $Mg_3Al_2Si_3O_{12}$, y posee asimismo algo de hierro en solución. Olivino y ortopiroxeno son, invariablemente, los constituyentes principales de los nódulos peridotíticos. El diópsido crómico y el piropo suelen estar presentes aunque sólo en pequeñas cantidades, si bien en algunos nódulos faltan por completo.

Aunque los nódulos peridotíticos son, de lejos, los tipos más abundantes en la mayoría de chimeneas de kimberlita, se conocen otras clases de nódulos. Entre los más interesantes están los constitui-




**MODELO DE UNA CHIMENEA DE KIMBERLITA basado en las estructuras que afloran en distintas chimeneas a diferentes niveles erosivos. Las chimeneas entraron en erupción durante el período cretácico, hace entre 70 y 130 millones de años, cuando los estratos que afloran actualmente en Kimberley se encontraban a 1400 metros de profundidad. La estructura geológica de la región está constituida por una secuencia alternante de rocas ígneas *(en color)* y sedimentarias *(en gris);* ambas secuencias, sedimentaria e ígnea, incluyen variedades petrológicas distintas. La erupción de la kimberlita produjo, probablemente, un cráter poco profundo rodeado por un cono de poca altura de materiales de expulsión. La abrasión que han sufrido las rocas de las paredes por acción de las kimberlitas ascendentes, y que se hizo más intensa cerca de la superficie, dio a la chimenea la forma de cono estrecho. Tanto los fragmentos de roca de las paredes como los nódulos ultramáficos, mucho más raros, se incorporan a la kimberlita. Varias chimeneas africanas *(a la derecha)* afloran en niveles más altos que las cercanas a Kimberley, la ciudad que ha dado nombre a este tipo de roca. El modelo se debe a J. B. Hawthorne, de la De Beers Consolidated Mines Ltd.**

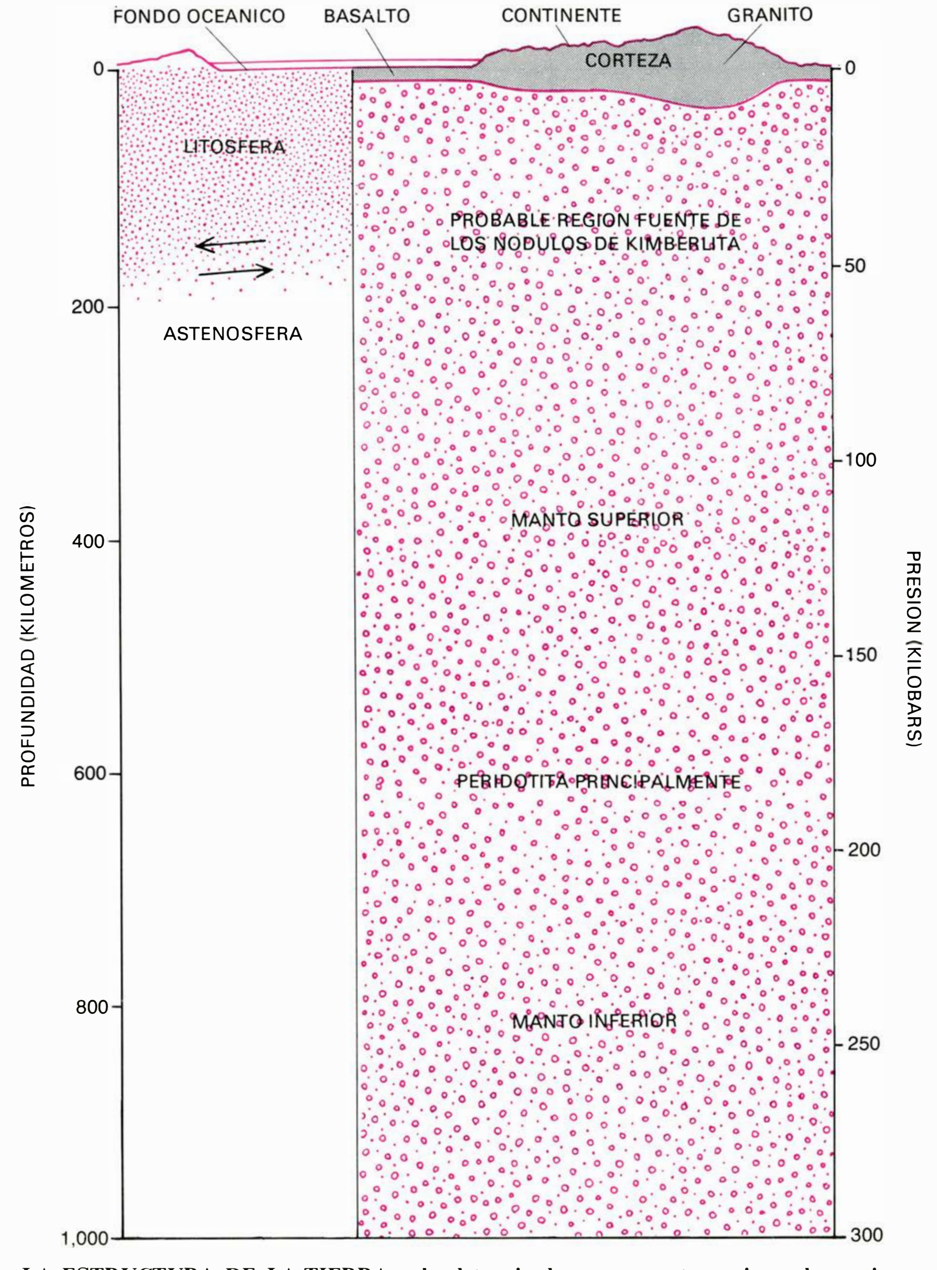
dos por eclogita, compuesta en gran parte de granate y de un piroxeno rico en calcio llamado omfacita. Las eclogitas tienen varias propiedades interesantes, no siendo la menor el que a veces encierren diamantes. (Sin embargo, la mayoría de los diamantes no se hallan en las eclogitas, sino formando cristales aislados dentro de la matriz de la kimberlita.)

La predominancia de peridotita en los nódulos ultramáficos apoya vigorosamente la hipótesis de que la peridotita es el principal constituyente del manto. Tal como se demostrará más adelante, los nódulos ultramáficos parecen haber sido transportados hacia arriba desde una profundidad de 100 o más kilómetros. Puesto que no existen discontinuidades en las propiedades físicas del manto por debajo de los 700 kilómetros, parece razonable concluir que todo el manto superior consta principalmente de peridotita. Y cabe la probabilidad de que el manto inferior tenga también la misma composición. La zona de refracción situada a 700 kilómetros no marca, a buen seguro, un cambio en la composición sino una transición mineralógica, en donde la presión altera la estructura cristalina de los materiales peridotídicos.

A veces, podemos calcular la profundidad de formación de una roca ígnea a partir de los datos que nos proporcionan los minerales que contiene. Las condiciones requeridas para que se forme el mineral, en particular la presión y temperatura, pueden determinarse en el laboratorio. Las medidas geofísicas permiten calcular luego la situación de las zonas de la tierra donde prevalecen estas condiciones. En las kimberlitas, el diamante aporta el límite superior de la profundidad de formación y distintos tipos de sílice el límite inferior.

El diamante es una forma cristalina del carbono que puede crearse sólo a temperatura y presión elevadas. En condiciones menos extremas, se favorece la aparición del grafito, otra forma cristalina del carbono. El conjunto de todas las combinaciones de presión y temperatura para las que las dos formas se encuentran en equilibrio se denomina curva de inversión del diamante-grafito. Un ejemplar de carbono situado en cualquier punto de esta curva podría adquirir cualquiera de las dos formas cristalinas, mientras que un aumento de presión o un descenso de temperatura favorecería la formación de diamante.

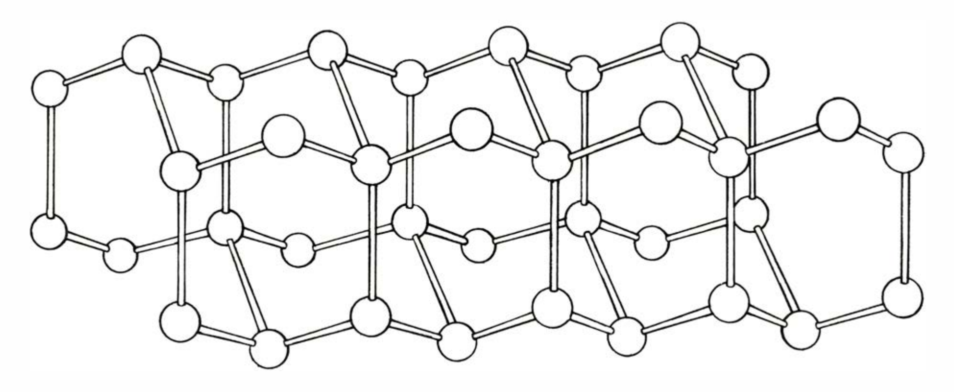
La temperatura y la presión existentes en el interior de la tierra están muy correlacionadas. La gráfica que nos da la temperatura en función de la presión (o profundidad) recibe el nombre de geoterma, y puesto que las kimberlitas son conocidas solamente en tierra firme, la curva que nos interesa es la geoterma continental. La intersección de la curva de inversión diamante-grafito con la geoterma continental da la profundidad mínima probable de formación de diamantes. Se ha visto que las curvas se juntan a una presión de unos 35 kilobars y a una temperatura de aproximadamente 800 grados Celsius. Esta presión corresponde a una profundidad de unos 105 kilómetros. En todas las zonas de profundidad menor, la presión es demasiado baja o bien la temperatura resulta excesivamente alta para formar diamantes. Por tanto, la presencia de diamante en la kimberlita indica que el mineral se formó a más de 100 kilómetros de profundidad. Sin embargo, esta profundidad da sólo un valor mínimo y, puesto que el diamante es estable a

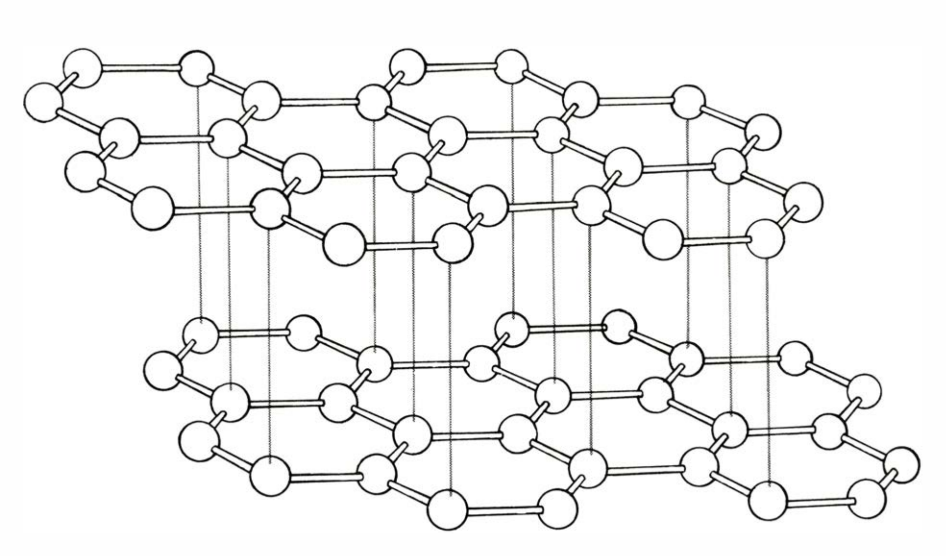



**LA ESTRUCTURA DE LA TIERRA se ha determinado en gran parte gracias a observaciones sísmicas. El límite entre la corteza y el manto, que está a unos 10 kilómetros de profundidad bajo los océanos y entre 35 y 70 kilómetros bajo los continentes, viene marcado por una discontinuidad en la velocidad de las ondas sísmicas. Probablemente, representa también un límite entre regiones de distinta composición química. La corteza oceánica está formada fundamentalmente por basalto y, por granito, la corteza continental; el manto parece ser peridotítico. Sólo se muestran los 1000 kilómetros superiores de la estructura terrestre; el manto se continúa hasta una profundidad de 2900 kilómetros y el núcleo se extiende desde este nivel hasta el centro de la tierra a 6370 kilómetros. Una discontinuidad sísmica situada a unos 700 kilómetros de profundidad divide el manto en una región superior y otra inferior, si bien esto representa quizá sólo un cambio de estructura cristalina y no de composición química. Una zona de baja velocidad de las ondas sísmicas fundamenta otro sistema de división en capas *(izquierda).* El material situado por encima de esta zona es la litosfera rígida que se desliza por encima de la astenosfera, más plástica. Se cree que los nódulos ultramáficos existentes en la kimberlita proceden de una zona del manto que se halla a una profundidad comprendida entre 100 y 300 kilómetros. (Ilustración propiedad de Adolph E. Brotman.)**

| | COMPONENTES DE LOS NODULOS | COMPOSICION APROXIMADA | SISTEMA CRISTALINO |
|---|---|---|---|
| PERIDOTITA | OLIVINO | $Mg_2SiO_4$ CON $Fe_2SiO_4$ | ORTORROMBICO |
| PERIDOTITA / PIROXENO | ORTOPIROXENO | $MgSiO_3$ CON $FeSiO_3$ | ORTORROMBICO |
| PERIDOTITA / PIROXENO | CLINOPIROXENO (DIOPSIDO CROMICO) | $CaMgSi_2O_6$ CON Fe Y Cr | MONOCLINICO |
| PERIDOTITA / ECLOGITA | GRANATE (PIROPO) | $Mg_3Al_2Si_3O_{12}$ CON Fe | CUBICO |
| ECLOGITA | CLINOPIROXENO (ONFACITA) | $CaMgSi_2O_6$ CON Fe, Na Y Al | MONOCLINICO |

**LOS CONSTITUYENTES MINERALES de los nódulos ultramáficos son principalmente silicatos, es decir, compuestos de silicio y oxígeno con iones metálicos. En los nódulos de peridotita más frecuentes los constituyentes dominantes son olivino y ortopiroxeno; la mayor parte de peridotitas contienen pequeñas cantidades de clinopiroxeno y granate que, no obstante, faltan a veces. Otro tipo de nódulo, la eclogita, está constituido por granate y un clinopiroxeno denominado omfacita. Uno de los caracteres distintivos de los nódulos minerales, que llaman inevitablemente la atención, estriba en que son mucho más ricos en magnesio que las rocas típicas de la corteza terrestre.**





**EL DIAMANTE Y EL GRAFITO son formas cristalinas del carbono si bien son estables a diferentes combinaciones de presión y temperatura. El grafito es la forma de baja presión; consta de un empaquetamiento de planos constituidos por anillos hexagonales. El diamante, que se origina sólo a elevada presión, tiene una estructura más simétrica, en la que cada átomo de carbono está rodeado por otros cuatro átomos. La presencia del diamante en la kimberlita nos da un indicio sobre las condiciones de formación de la roca. Los diamantes se separan de la kimberlita por erosión.**

todas las presiones situadas por debajo de la curva de inversión, se podría formar a cualquier profundidad mayor.

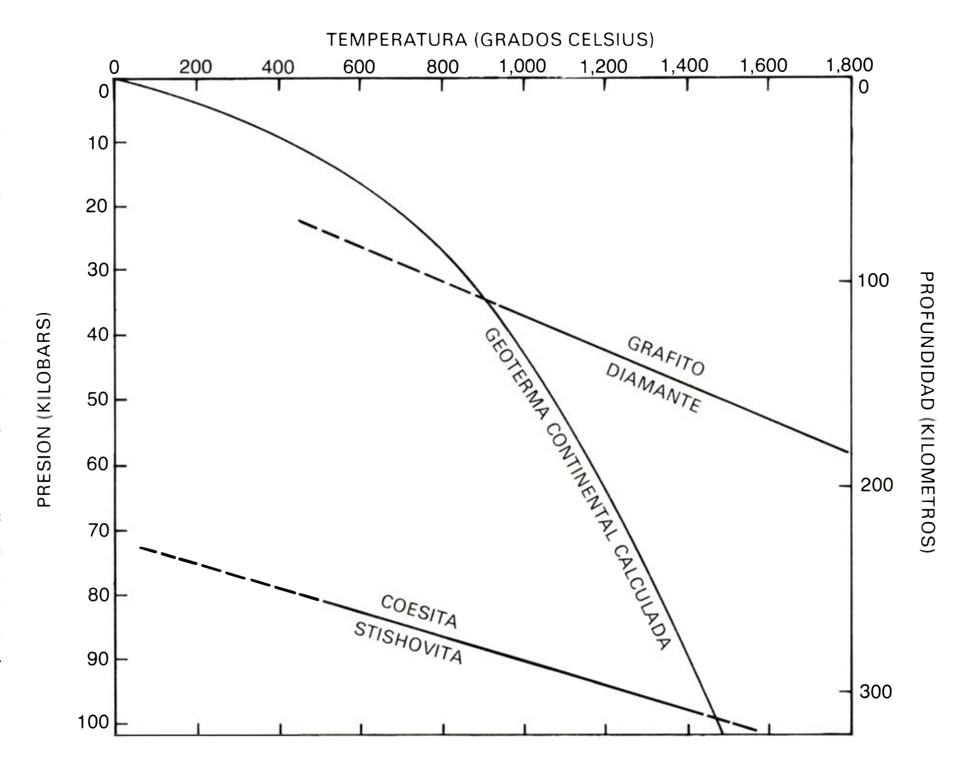
A partir de la curva de inversión de dos formas cristalinas de la sílice, podemos calcular una profundidad máxima para la formación de las kimberlitas. A baja presión, la sílice está representada por el cuarzo, mineral muy conocido. Conforme aumenta la presión, cambia su estructura cristalina, convirtiéndose primero en coesita y, luego, en stishovita. La coesita se encuentra en el diamante en forma de diminutas inclusiones. Recientemente, Joseph R. Smyth, de Los Alamos Scientific Laboratory, y C. J. Hatton, de la Universidad de Ciudad del Cabo, han descubierto cristales de coesita, relativamente grandes, en una eclogita procedente de una chimenea de kimberlita en Africa del Sur. La stishovita, por el contrario, no se ha observado nunca asociada a la kimberlita. La curva de inversión stishovita-coesita corta a la geoterma continental a una presión de unos 100 kilobars, que corresponde a una profundidad de unos 300 kilómetros. Así pues, la presencia de diamante y la ausencia de stishovita indican que las kimberlitas se originan a una profundidad comprendida entre los 100 y 300 kilómetros.

Puede hacerse una comprobación adicional en relación con estos descubrimientos si se compara el punto de fusión de las peridotitas, a diferentes presiones y temperaturas, con la geoterma continental. Puesto que los nódulos ultramáficos fueron arrastrados hasta la superficie por la actividad volcánica, deben proceder forzosamente de una región sujeta a episodios de fusión. Esta comparación permite pensar que es muy probable que el manto funda a una profundidad comprendida entre los 100 y los 200 kilómetros, aproximadamente, que es donde la curva de fusión y la geoterma se acercan más. Un pequeño aumento de temperatura a esta profundidad fundiría la peridotita sin agua. Una discreta adición de agua haría descender el punto de fusión de la peridotita lo suficiente como para inducir como mínimo una fusión parcial.

La curva de fusión de la peridotita y la presencia de diamante y coesita en las kimberlitas sugiere la existencia de un intervalo amplio de profundidades en las cuales todos los nódulos ultramáficos podrían originarse. Sería también de gran utilidad calcular la profundidad de origen de los nódulos considerados individualmente. Para acometer este tipo de cálculos cabe determinar el estado de los sistemas minerales existentes en el nódu-

lo y calibrar luego las mediciones con observaciones de laboratorio.

El grado de disolución entre los ortopiroxenos y los clinopiroxenos constituye un indicador muy útil. En 1966, B. T. C. Davis y Francis R. Boyd, de la Carnegie Institution del Washington's Department of Terrestrial Magnetism, demostraron que la solubilidad mutua de estas dos fases aumenta con la temperatura, si bien es casi independiente de la presión. Así pues, la solubilidad es un geotermómetro potencialmente muy útil. La presión puede determinarse de modo similar midiendo el grado de reacción entre ortopiroxenos y granates coexistentes. En ese caso, el grado de reacción depende de la presión y de la temperatura, si bien la primera puede deducirse si la segunda se calcula en primer lugar a partir de la solubilidad ortopiroxeno-clinopiroxeno. Conviene advertir que las temperaturas y presiones calculadas de este modo no corresponden necesariamente a la profundidad en que se originaron los nódulos en un comienzo. Dan solamente aquella profundidad a la que los sistemas minerales se encontraron en equilibrio por última vez. La permanencia prolongada en niveles situados por encima o por debajo del lugar de formación podría "poner en marcha" de nuevo los indicadores de temperatura y presión.



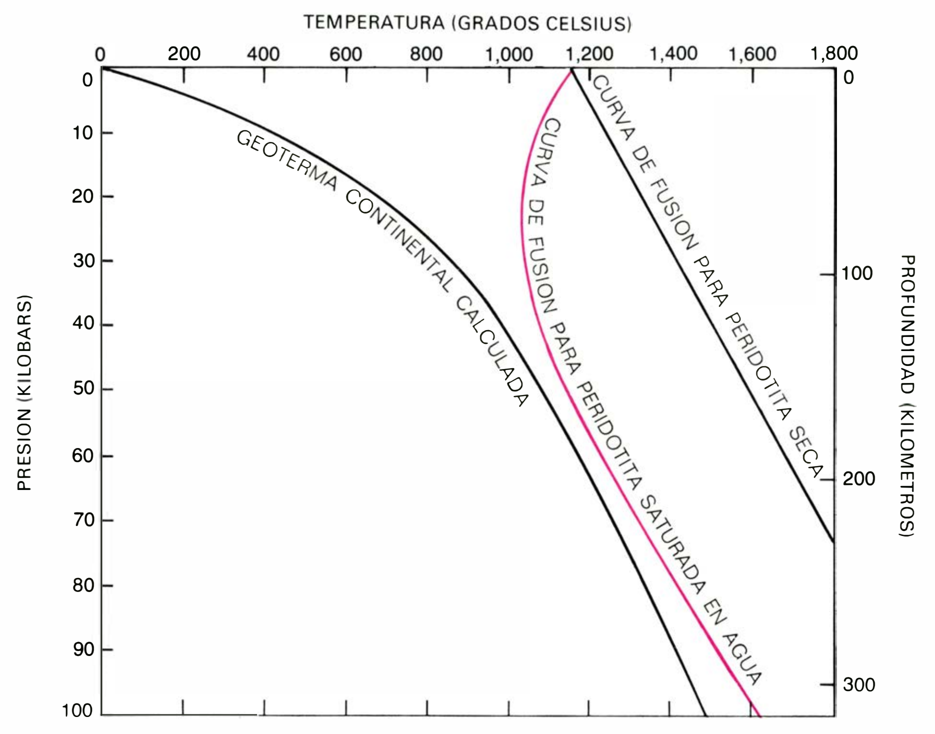

**LOS LIMITES SUPERIOR E INFERIOR (en profundidad), relativos al origen de la kimberlita, vienen determinados por formas de carbono y sílice que se encuentran en las chimeneas. La presencia de diamante indica la formación de kimberlita a una profundidad que está por debajo de la curva de inversión diamante-grafito, la cual marca la zona en donde estas fases se hallan en equilibrio. Análogamente, la kimberlita contiene sílice en forma de coesita, pero no en forma de stishovita; por tanto, es probable que provenga de una región situada por encima de la curva de inversión stishovita-coesita. Las temperaturas del interior de la tierra pueden calcularse a partir de las mediciones del flujo de calor superficial; la curva resultante en las regiones situadas bajo los continentes se denomina geoterma continental. Es probable que la kimberlita y los nódulos que contiene se haya formado a lo largo de la geoterma entre aquellos puntos donde la geoterma corta la curva de inversión diamante-grafito y la curva de inversión stishovita-coesita.**

Los primeros datos sobre presión y temperatura relativos a los nódulos de peridotita fueron calculados en 1973 por Boyd y P. H. Nixon. Hallaron que los nódulos procedentes de la misma chimenea presentaban a menudo unas presiones y temperaturas de equilibrio que cubrían un amplio intervalo. Pero los datos no se distribuían al azar, sino que la presión y la temperatura se correlacionaban de suerte que los valores de la mayoría de nódulos caían dentro de una franja estrecha. Se vio que la posición de la franja variaba algo de una chimenea a otra, pero, por regla general, coincidía con la geoterma continental predicha por las medidas de flujo de calor. Esta distribución implicaba que la kimberlita ascendente incorporaba de forma aleatoria una serie de muestras de material del manto a través del cual pasa.

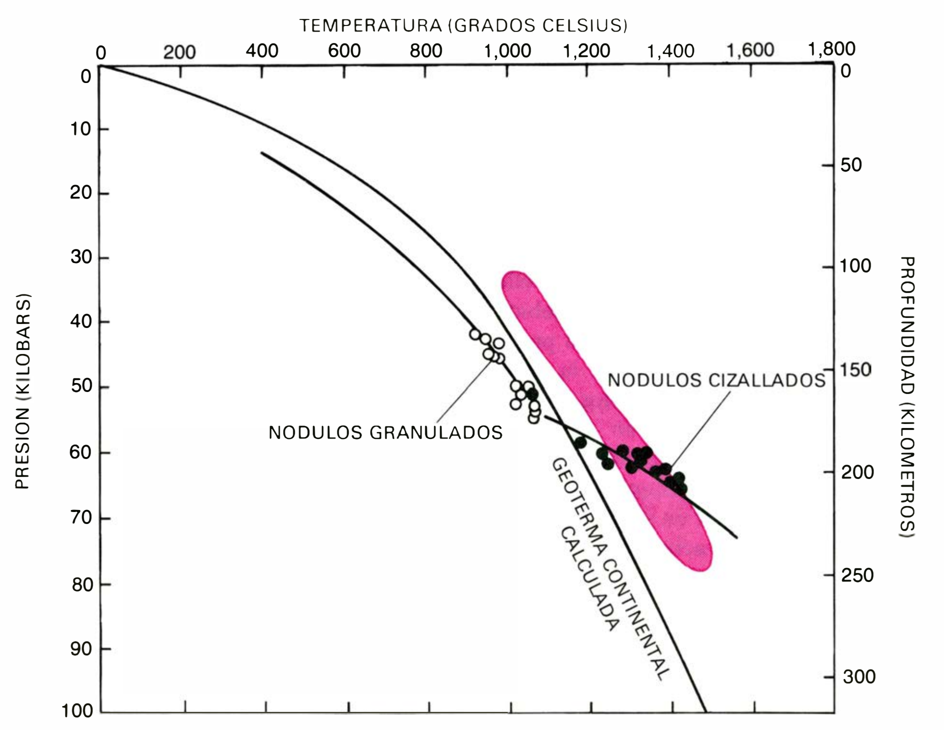
A partir de los cálculos de Bayd y Nixon, se llegó a un descubrimiento sorprendente: la constatación de que la textura de los nódulos varía en relación con su profundidad aparente de origen. En mineralogía, la textura indica las relaciones espaciales de los granos minerales entre sí. En los nódulos peridotíticos más frecuentes, los granos tienen un diámetro aproximado de medio centímetro, no presentando una clara deformación de su estructura cristalina y dando pocos indicios de poseer una orientación preferente. En otros nódulos, sin embargo, la estructura de unos cristales queda alterada mientras que otros aparecen triturados; cambios todos ellos que pueden interpretarse como debidos a los efectos de la deformación producida por cizalla. El inicio de la deformación viene señalado por los cristales de olivino que desarrollan en su red cristalina unas estrías, denominadas bandas de deformación, y adquieren también una textura granular en sus bordes. Si la deformación sigue actuando, la roca se fractura, dando una matriz de olivino finamente molido con fragmentos de ortopiroxeno y granate a modo de inclusiones. La deformación extrema produce rocas finamente bandeadas, en las que todos los minerales, con la excepción frecuente del granate, tienen un tamaño de grano muy reducido. En algunos ejemplares existen pruebas de recristalización, que da lugar a rocas de grano grueso; estas últimas difieren de las peridotitas granulares ordinarias en que los granos tienen una orientación preferente. Todos los ejemplares deformados reciben el nombre genérico de nódulos cizallados.

Varias curvas de presión y temperaturas calculadas por Boyd y Nixon en 1973 indicaron que los nódulos cizallados provenían casi invariablemente de una profundidad mayor que los nódulos granulosos. Además, pareció que existía una brusca inflexión hacia arriba por parte de la geoterma en la profundidad correspondiente a los nódulos cizallados; es decir, a esta profundidad, la temperatura parecía ser superior a la que cabría esperar de las mediciones de flujo de calor realizadas en superficie. Se generalizó la opinión de que los nódulos cizallados podrían representar muestras de material procedente de la astenosfera. El deslizamiento de las placas litosféricas sobre el manto en esta región podría conducir ciertamente a una deformación extrema de las rocas y el calor de fricción resultante podría ser el responsable de las temperaturas más elevadas.

Tan interesante idea ha sido puesta en entredicho desde entonces. El cálculo de las presiones y temperaturas de equilibrio ha sido objeto de estudios más precisos llevados a cabo especialmente por B. J. Wood y S. Banno, de la Universidad de Manchester. Los nuevos cálculos referentes a'las curvas de pre-




**CURVA DE FUSION** de la peridotita. Proporciona otro nuevo argumento al posible origen de la kimberlita. Al ser esta roca un producto volcánico, debe haberse originado en una región en donde, como mínimo, algunos de los materiales que constituyen el manto se hallan fundidos. La curva de fusión para la peridotita seca *(en negro)* presenta su máxima aproximación a la geoterma continental en el intervalo de profundidad esperado, comprendido entre 100 y 300 kilómetros. La fusión podría producirse por un calentamiento episódico del manto a esta profundidad, y ello ocasionaría una inflexión de la geoterma hacia arriba. La adición de agua a las rocas del manto *(color)* podría hacer variar suficientemente la curva de fusión de la peridotita como para provocar la fusión parcial.




**PROFUNDIDAD DE ORIGEN** de los nódulos ultramáficos estimada al calcular la temperatura y presión a la que se encontraron por última vez en equilibrio determinados sistemas minerales. Una serie de cálculos realizados en 1973 por Francis R. Boyd y P. H. Nixon, de la Carnegie Institution del Washington's Department of Terrestrial Magnetism, sugirieron que los nódulos podían dividirse en dos series basadas en su textura. Los nódulos granulares, o tipo más común *(círculos vacíos)*, se concentran a lo largo de una curva próxima a la geoterma continental predicha. Sin embargo, los ejemplares muy deformados denominados nódulos cizallados *(círculos rellenos)* parecen derivar de niveles más profundos, sugiriendo, igualmente, que las temperaturas allí existentes son más elevadas que las calculadas a partir de las mediciones del flujo de calor. Esta distribución puede explicarse si se supone que los nódulos cizallados proceden de la estenosfera, en donde el deslizamiento de las placas litosféricas podría producir deformación y calentamiento. Las presiones y temperaturas correspondientes a los nódulos han sido calculadas de nuevo por Carter y Mercier. Sus resultados *(banda en color)* confirman que los nódulos cizallados provienen de niveles más profundos.

sión y temperatura de los nódulos existentes en las kimberlitas, como los realizados por J. C. Mercier y Neville L. Carter, de la State University de Nueva York en Stony Brook, no demuestran inflexión alguna a la profundidad correspondiente a los nódulos cizallados. Por otra parte, se ha confirmado la observación según la cual los nódulos cizallados proceden generalmente de profundidades mayores que los nódulos granulares. Las estimaciones de profundidad concuerdan también, en general, con las realizadas utilizando otras técnicas. La mayoría de presiones de equilibrio se encuentran comprendidas entre 30 y 80 kilobars, que corresponden a profundidades situadas entre los 100 y los 250 kilómetros, aproximadamente.

Para interpretar el origen de los nódulos cizallados, varios investigadores han propuesto otras explicaciones en las que el responsable de la deformación es el propio movimiento de la kimberlita. Así, por ejemplo, Harry W. Green, de la Universidad de California en Davis, e Y. Gueguen, del Laboratorio de Geología Estructural de Nantes, han propuesto un modelo en el que una masa ascendente de peridotita sólida desarrolla una zona epidérmica constituida por rocas con un grado de deformación elevado. Esas rocas se incorporan más tarde al magma, formado por fusión cerca de la parte alta de la estructura, como nódulos cizallados. Sin embargo, es preciso poner de relieve que el origen y significado de los nódulos cizallados continúa siendo un tema de investigación y controversia, no habiéndose llegado todavía a un acuerdo al respecto.

Si bien los nódulos ultramáficos derivan del manto, bajo ningún concepto puede afirmarse que sean típicos del material que constituye esta envoltura de la tierra. El manto primitivo, formado en las primeras etapas de la historia del planeta, era probablemente muy parecido al material observado en los meteoritos condríticos, modificado sólo por una etapa de fusión en la que se separó la fase de hierro-níquel para formar el núcleo. Parece improbable que un material de este tipo pueda identificarse en los nódulos de peridotita que se descubren hoy en superficie. En realidad, las pruebas suministradas por las relaciones isotópicas de diferentes rocas ígneas inclinan a pensar en la existencia de varias e importantes etapas de fusión en el manto superior.

La eliminación persistente, debido a la actividad volcánica, de los elementos más volátiles ha incidido en la alteración del manto superior. El material representado por los nódulos de peridotita

puede ser, pues, un producto residual. Cuando se calienta una peridotita, una de las primeras fracciones en fundir posee una composición basáltica, y no hay que olvidar que se ha emitido basalto, en grandes cantidades, en casi todos los períodos geológicos. Los basaltos tienen más calcio y aluminio que la peridotita; por tanto, el manto residual debería estar empobrecido en estos elementos; por otro lado, debería ser comparativamente rico en magnesio. Estas alteraciones se expresarían mineralógicamente por la rareza o ausencia de granate y clinopiroxeno, tal como ocurre en los nódulos de kimberlita más frecuentes. Es significativo que, comparativamente, estos nódulos parezcan tener un origen superficial, y que los nódulos cizallados, procedentes de niveles más hondos, estén generalmente menos empobrecidos en componentes basálticos.

Algunos nódulos de kimberlita podrían también derivar de líquidos basálticos que hubieran quedado atrapados en el manto, cristalizando allí en forma de acumulaciones ("cumulates"), que son asociaciones de fases cristalinas depositadas por estos líquidos cuando migran hacia la superficie. Varios nódulos con abundancia de clinopiroxeno y granate se han interpretado provisionalmente como acumulaciones.

La interpretación de las kimberlitas se complica al considerar la azarosa historia que ha sufrido el manto superior. Incluso a varios centenares de kilómetros por debajo de la superficie, la composición y estructura cristalina de las rocas queda alterada una y otra vez por una amplia gama de procesos físicos y químicos. Así, por ejemplo, los fluidos que contienen sales disueltas pueden penetrar a través de los bordes de grano y microfracturas de una roca de densidad elevada. Las reacciones químicas con los iones disueltos pueden cambiar por completo el carácter de la roca afectada. La flogopita, o mica que se encuentra en los nódulos de peridotita, se forma frecuentemente de este modo.

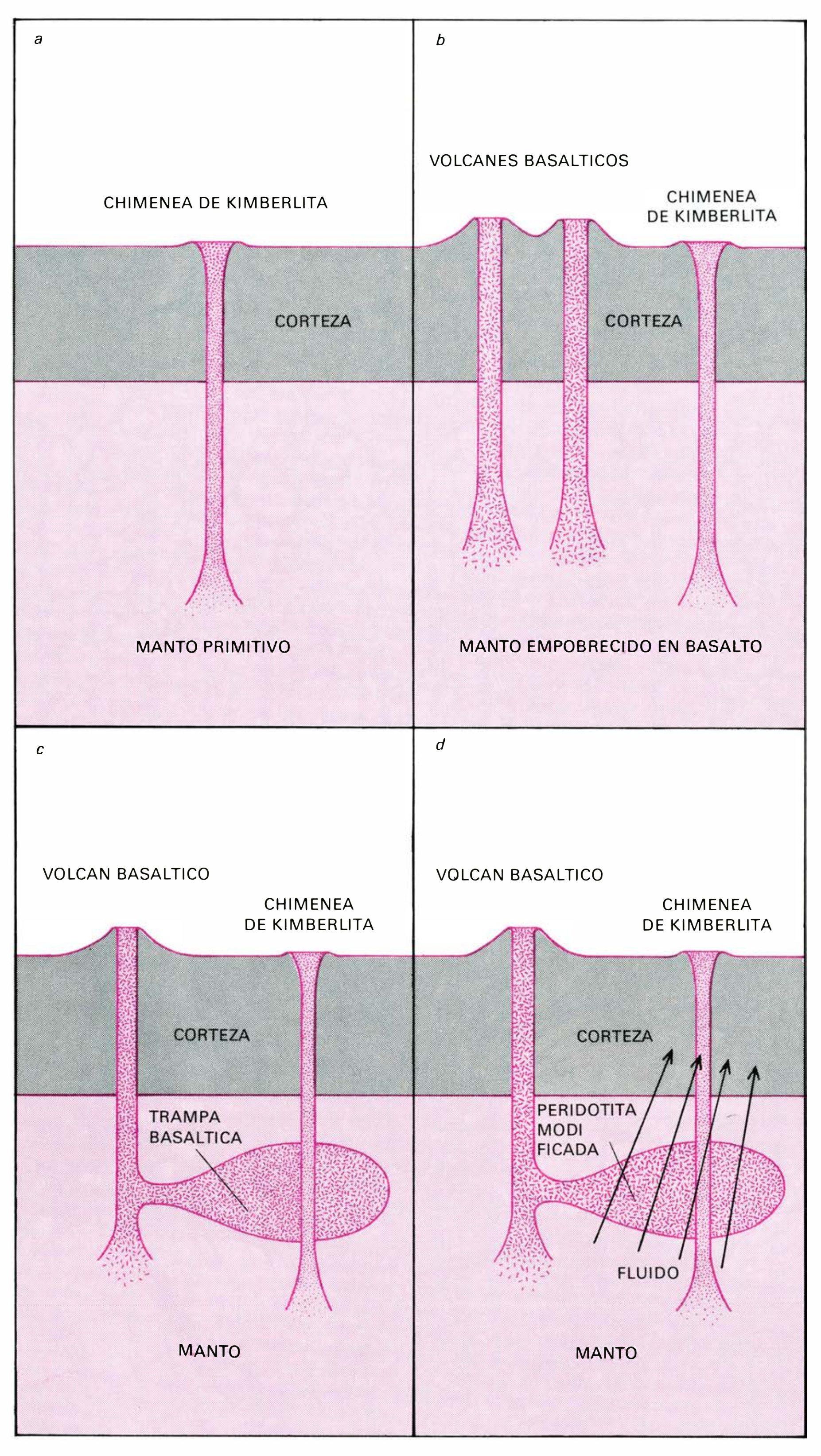
Es probable que una fusión seguida de enfriamiento y recristalización lentos haya alterado la estructura de muchas rocas incorporadas en los nódulos kimberlíticos. De esta manera quedan, pues, destruidas las pruebas necesarias para la identificación de su origen. No obstante, pueden reconstruirse algunos acontecimientos de la historia de los nódulos. Por ejemplo, en muchos de ellos, el granate y el clinopiroxeno tienden a hallarse estrechamente asociados. En una etapa anterior, de elevada temperatura, pudieron haber existido



**NODULO GRANULOSO, procedente de la chimenea de Matsoku, en Lesoto, que muestra una estructura no deformada en una microfotografía de una sección pulida. En ella se encuentran los cuatro constituyentes principales de la peridotita. Los cristales rosados (o pardos) con bordes obscuros son de granate; los verdes son de diópsido crómico, los de tinte marrón son ortopiroxenos y los incoloros y de pequeño tamaño constituyen el olivino. Aumento: dos diámetros.**



**NODULO CIZALLADO visto en una microfotografía realizada con filtros polarizadores cruzados, para aumentar el contraste entre cristales. Los cristales de tamaño mayor son ortopiroxenos. Están englobados en una matriz de olivino que ha sido reducido a una especie de polvo finamente molido a causa de la deformación sufrida. El ejemplar procede de la chimenea de Bultfontein.**



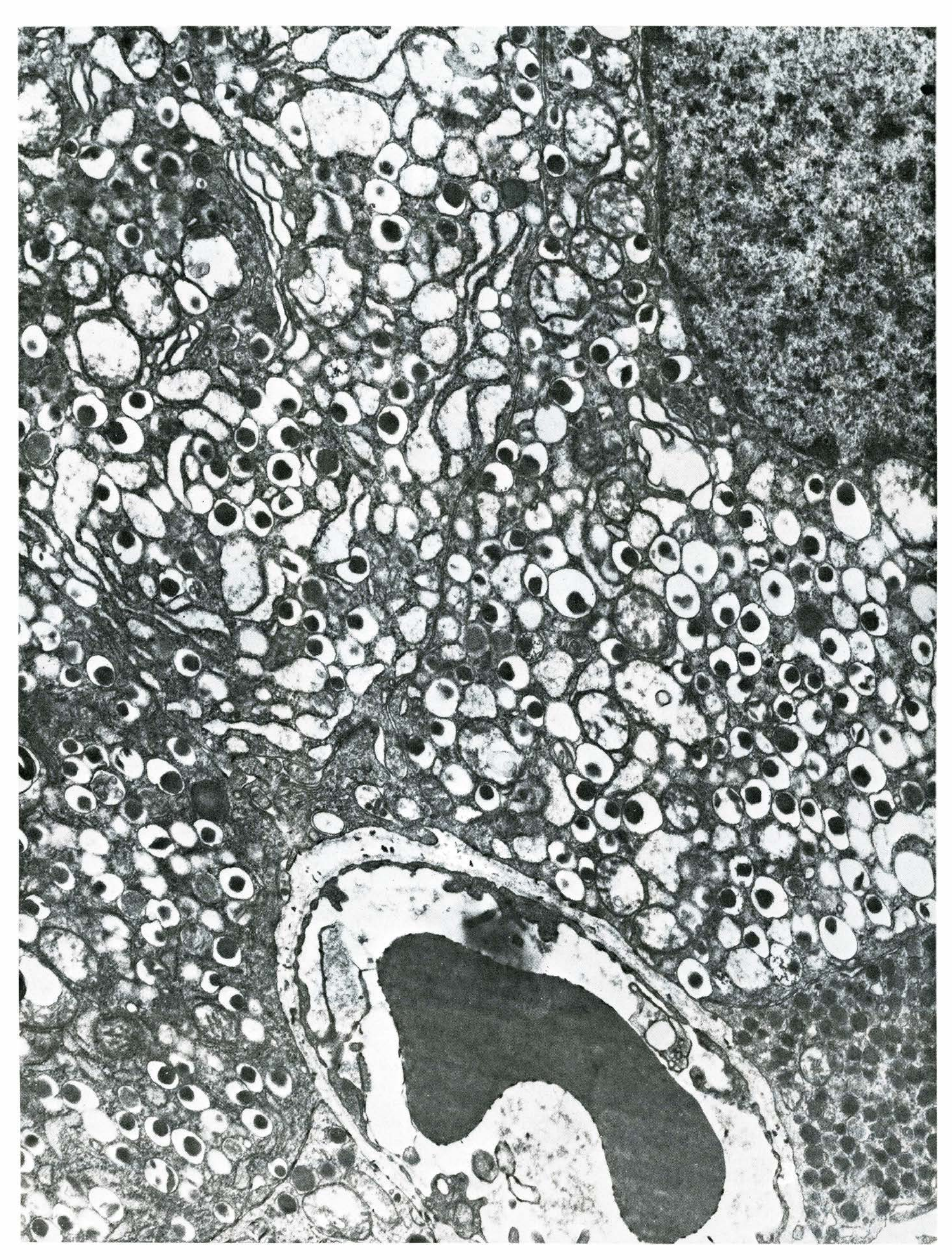

**EL MATERIAL ORIGINARIO de los nódulos ultramáficos es muy probable que sea alguno de los constituyentes del manto superior, si bien su naturaleza exacta es aún dudosa. Una posibilidad (*a*) es que los nódulos sean ejemplares de material del manto primitivo que han permanecido esencialmente sin alterar desde las primeras etapas de la historia terrestre. Este modelo se considera inverosímil debido a que muchos de los procesos que podrían alterar la composición del manto han estado actuando desde hace mucho tiempo. Así, por ejemplo, la erupción masiva de lavas basálticas hubiera podido dejar al manto empobrecido en determinados elementos, mientras se enriquecía en otros. Para otra hipótesis (*b*), los nódulos representan precisamente este tipo de residuo de material del manto empobrecido en basalto. La composición que cabe esperar de este material es parecida a la observada en los nódulos de peridotita más frecuentes. Otros tipos de nódulos pueden derivar de trampas de basalto existentes en el manto o de acumulaciones allí precipitadas debido a migración de magma basáltico hacia la superficie (*c*). La composición y estructura mineral de estos materiales mantenidos en trampas (en realidad de casi todas las rocas del manto) podrían modificarse localmente gracias al paso a través suyo de fluidos mineralizadores (*d*).**

disueltos entre sí, o pudieron haberse encontrado ambos disueltos con un ortopiroxeno. Al enfriarse, los dos componentes precipitaron quedando, únicamente, la asociación espacial como indicio de la primitiva estructura.

El origen de los nódulos de eclogita ha resultado ser especialmente difícil de comprender. Las eclogitas se parecen, en su composición, a los basaltos, y ello explica el que se interpreten, de ordinario, como acumulaciones precipitadas a partir de líquidos basálticos. Sin embargo, su textura bandeada no siempre corrobora esta hipótesis. Otra explicación propuesta con anterioridad por Alfred E. Ringwood, de la Australian National University, sugiere que derivaron de secciones de la corteza oceánica hundidas en el manto en zonas de subducción, en donde convergen continentes y fondo oceánico. Si tal es el origen real de los nódulos de eclogita, la presencia de diamantes en ellas resulta particularmente intrigante.

El origen de la matriz kimberlítica permanece, quizá, más obscuro aún que el de los nódulos ultramáficos. Las kimberlitas poseen el alto contenido en magnesio propio de los líquidos del manto, pero, también, son extremadamente ricas en elementos volátiles, y tienen concentraciones de potasio más elevadas que las que se dan normalmente en rocas de este tipo ricas en magnesio. Líquidos parecidos a la kimberlita podrían producirse por cristalización fraccionada de magmas basálticos; cabe el que no sea pura coincidencia el asentamiento de un volcanismo basáltico generalizado en las zonas correspondientes a Africa meridional y Siberia. Bolsas de lava fundida, inmovilizadas por trampas, pudieron haber evolucionado hacia una constitución kimberlítica, si bien, en algunos casos, el fluido debe haber permanecido así atrapado durante un largo lapso de tiempo, del orden de 100 millones de años. O bien, el fluido kimberlítico pudiera ser el resultado de una fusión parcial muy débil de material del manto, enriquecido quizás en determinados elementos por la migración de fluidos a través suyo.

La interpretación de las kimberlitas y de los nódulos que contienen andaría por carriles más seguros si su historia fuera menos complicada. Sin embargo, aun cuando los datos que nos suministran sean, hoy por hoy, confusos, no por ello puede negarse que estas rocas constituyen una de las fuentes de información que tenemos más a mano para el estudio del material que forma el manto superior.



**ULTRAESTRUCTURA** de las células insulares pancreáticas de rata. Se observan dos células *B*, cuyos gránulos secretorios muestran un contenido electrodenso retraído, lo que facilita la visión de la membrana que los envuelve; esta característica nos permite diferenciar la célula *B* de otras células insulares *(abajo, a la derecha)*. En la parte inferior de la microfotografía aparece un capilar fenestrado con un eritrocito en su interior. Esta microfotografía, de 15.000 aumentos, ha sido realizada en la Facultad de Medicina de la Universidad de Sevilla.

# ¿Cómo se segrega la insulina?

*Una alteración de las células beta del páncreas endocrino es causa primaria de la diabetes. El conocimiento de la quimiosensibilidad de estas células constituirá uno de los puntos de partida para el tratamiento de la enfermedad*

Raimundo Goberna

La diabetes "mellitus" es una enfermedad metabólica que se caracteriza por la aparición de glucosa en orina y elevación de los niveles fisiológicos de glucosa en sangre. Etimológicamente, procede del griego *diabaínein* (que significa correr a través de) y del latín *mellitus* (con sabor a miel). Se acompaña de una serie de signos entre los que cabe destacar la poliuria (volumen de orina superior al normal), la polidipsia (sed extraordinaria) y la polifagia (aumento anormal del apetito). Este trastorno hereditario se halla muy generalizado, pues llegan a padecerlo del 2 al 4 por ciento de la población.

En líneas muy generales, y simplificando el problema, podemos decir que la diabetes es causada por una deficiencia absoluta o relativa de los niveles circulantes de una hormona llamada insulina, segregada por las células beta de los islotes de Langerhans del páncreas endocrino. La extirpación quirúrgica de la totalidad del páncreas o la lesión química irreversible y selectiva de las células beta por determinados fármacos (estreptozotozina o alloxana) reproducen los síntomas y signos de la enfermedad.

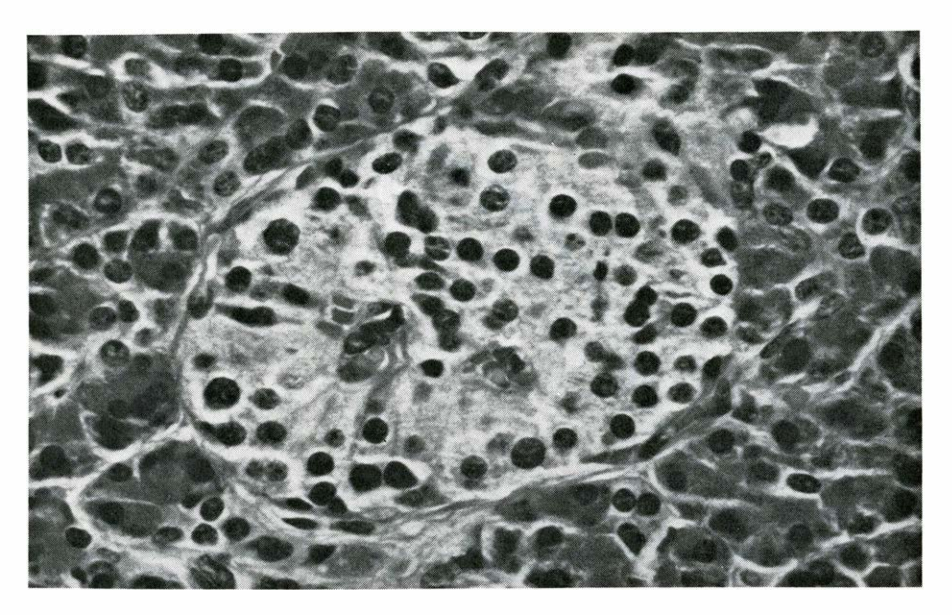
Aunque conocida desde la Antigüedad (aparece ya su descripción en el papiro de Ebers), el origen de la diabetes es un descubrimiento reciente (última centuria) y su tratamiento resulta posible desde hace poco más de cincuenta años. El 18 de febrero de 1869, en la Universidad Friedrich-Wilhelms de Berlín, Paul Langerhans leía su tesis doctoral sobre "Microscopía anatómica del páncreas". El trabajo estaba dedicado al Profesor Virchow y constaba de 32 páginas. Casi de soslayo, Langerhans describe la aparición, entre los acini exocrinos, de unos acúmulos celulares que no parecen tener relación con la función excretora pancreática. En todo el trabajo no se cita para nada la diabetes ni se relacionan estos islotes celulares con la secreción de ninguna sustancia. Hubo que esperar unos treinta años (1898) para que Oscar Minkowsky y von Mering, de Estrasburgo, comunicaran, por primera vez, que la extirpación quirúrgica de la totalidad del páncreas inducía en el perro la aparición de la diabetes. Y quedaba así establecida la relación páncreas-diabetes.

El páncreas es una glándula que tiene una doble función: exocrina y endocrina. La secreción exocrina o externa se denomina jugo pancreático. La endocrina, a cargo de los islotes de Langerhans, segrega hormonas, que pasan directamente a la sangre.

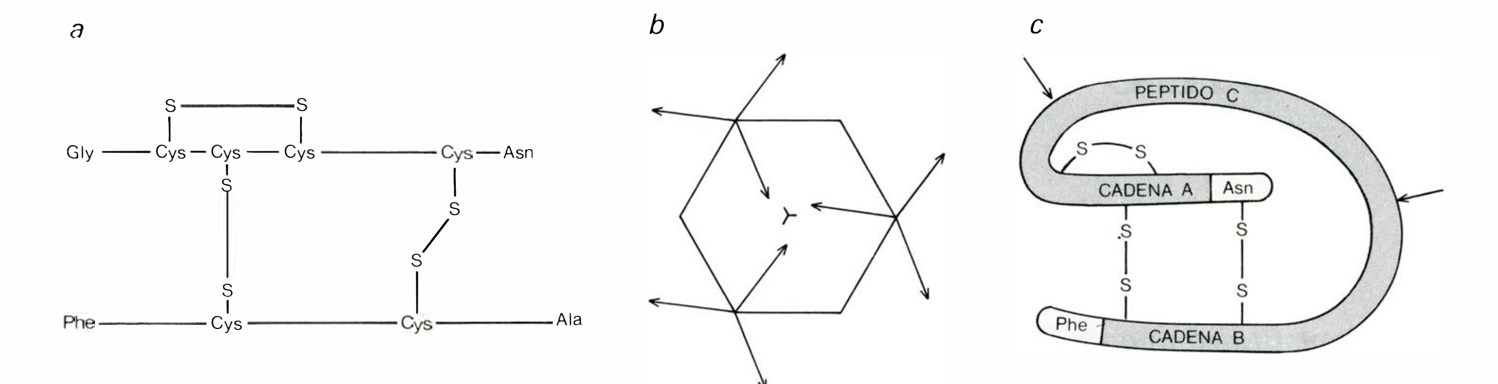
Al microscopio óptico, los islotes de Langerhans aparecen como acúmulos celulares con varios tipos de células: las células beta que segregan insulina, las células alfa que segregan el glucagón y otros tipos celulares que son los responsables de la secreción de gastrina, somatoestatina y otras hormonas. Las células alfa suelen aparecer en la periferia del islote y las células beta hacia el centro *(véase la ilustración inferior de esta misma página)*.

Al microscopio electrónico, en la célula beta se destacan unos gránulos densos dentro de unas vesículas. Estos gránulos se denominan beta y contienen insulina y proinsulina *(véase la ilustración de la página opuesta)*.

El aislamiento de la hipotética hormona pancreática fue laborioso y tardío. Su descubrimiento se debió a dos cirujanos canadienses, Banting y Best, en 1921, y se aplicó inmediatamente en clínica con resultados espectaculares. Es interesante conocer la causa por la que se tardó más de 20 años en la extracción de la insulina. La dificultad consistía en la purificación a partir de tejido pan-



**ISLOTE DE LANGERHANS rodeado por células acinares pancreáticas. Las células constituyentes presentan un núcleo redondo con cromatina granular y están separadas entre sí por escaso tejido conjuntivo que incluye abundantes capilares sanguíneos. Con técnicas especiales, podría diferenciarse al microscopio óptico distintos tipos celulares, principalmente las células beta secretoras de insulina y alfa, de glucagón. Se han descrito tipos productores de gastrina y somatoestatina.**

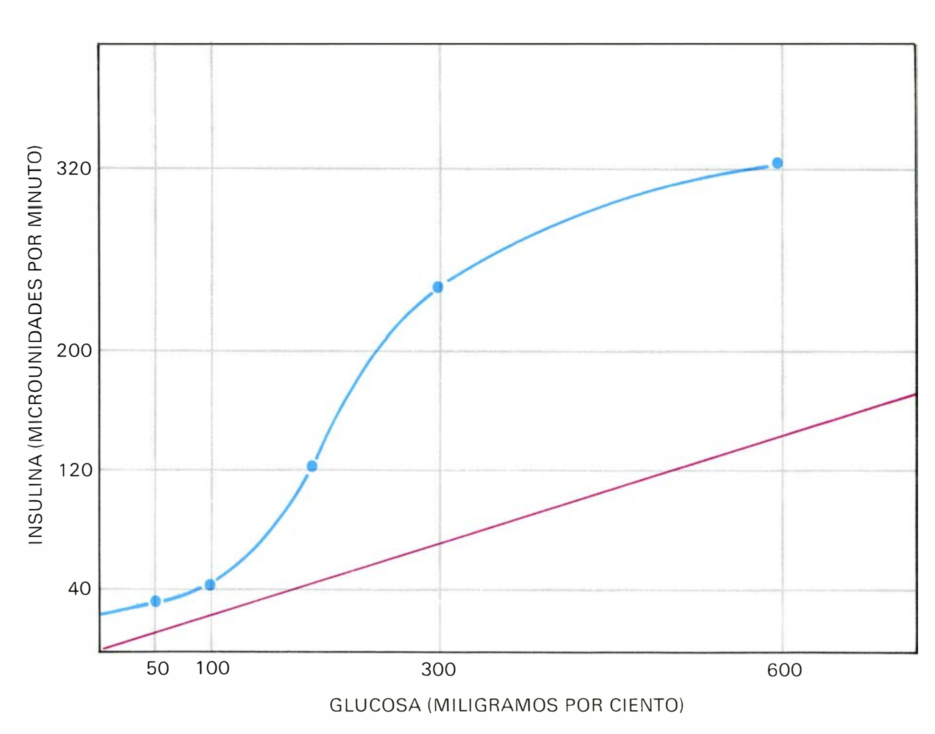



**LA MOLECULA DE INSULINA tiene un peso molecular de 5900. En su estructura *(a)* distinguimos dos cadenas. La cadena *A* comienza con la Gly y termina con Asn y tiene un puente disulfuro intracatenario. La cadena *B* comienza con la Phe y termina con la Ala. Las dos cadenas están unidas entre sí por dos puentes disulfuros. En *b* se muestra el hexámero de insulina. El cristal formado contiene Zn. El precursor de la insulina, denominado proinsulina *(c)*, tiene un peso molecular de 9000. En presencia de un enzima proteolítico como la tripsina, se rompe la cadena en los lugares indicados por las flechas, liberándose el péptido de conexión (o C) y apareciendo un resto que es la insulina activa.**

creático. El páncreas es, en un 98 por ciento, exocrino: tiene por función segregar jugo pancreático compuesto de agua, bicarbonato y enzimas necesarios para la digestión de lípidos, proteínas y carbohidratos. Ahora bien, en la extracción, se provoca involuntariamente la activación de tripsina y quimotripsina, que son enzimas proteolíticos, es decir, degradantes de la insulina al tratarse de una hormona proteica. La rotura de las cadenas peptídicas de la insulina acaba con la funcionalidad o actividad biológica de la misma.

La solución de este problema la encontraron varios grupos a la vez en lugares distintos (Rumanía, Grecia, Canadá, etcétera), pero la más conocida es la experiencia de Banting y Best. Ambos investigadores operaron a un perro y le ligaron los conductos excretores pancreáticos, provocando de esta suerte la atrofia del páncreas exocrino en unas pocas semanas. El páncreas procedente de este animal era pobre en enzimas proteolíticos; efectivamente, un homogenizado del mismo podía bajar la glucemia en el perro diabético.

En los años siguientes, se logró purificar la insulina, conocer sus características fisicoquímicas, sus propiedades y, por último, el mecanismo de su síntesis. En 1955, Sanger dilucidó la estructura de la insulina bovina y, en 1963, investigadores norteamericanos, chinos y alemanes, simultánea e independientemente, lograron la síntesis de dicha hormona.




**CINETICA DE LA SECRECION de insulina por la célula *B* en presencia de concentraciones crecientes de glucosa. Podemos observar *(azul)* cómo la cinética es sigmoidea, con la rama ascendente del sigmoide entre 100 y 300. La respuesta lineal *(rojo)* aparece en determinadas condiciones metabólicas como el ayuno. En estas pruebas hemos utilizado el páncreas aislado y perfundido.**

La insulina es una proteína pequeña, de peso molecular 5900. Este rasgo suele tomarse como unidad de referencia, de modo que las moléculas de peso molecular menores se denominan péptidos, y las de peso molecular superior, proteínas. (Las proteínas están formadas por polimerización de péptidos.) Se compone de dos cadenas, *A* y *B*, unidas por dos puentes disulfuro. Existe también un puente disulfuro intracatenario en la cadena *A* *(véase la ilustración superior)*.

La insulina fue la primera proteína en que se describió con exactitud la secuencia de aminoácidos de ambas cadenas constituyentes. También se ha estudiado las diferencias aminoacídicas de la molécula insulínica entre las especies animales, encontrándose que son relativamente pequeñas. La actividad biológica varía poco de una especie a otra, lo que representa una gran ventaja para su utilización en el tratamiento de la diabetes. En su configuración forma hexámeros con cationes de cinc ($Zn^{++}$), agrupándose varias moléculas del modo que aparecen en la ilustración superior (*b*), de esta misma página.

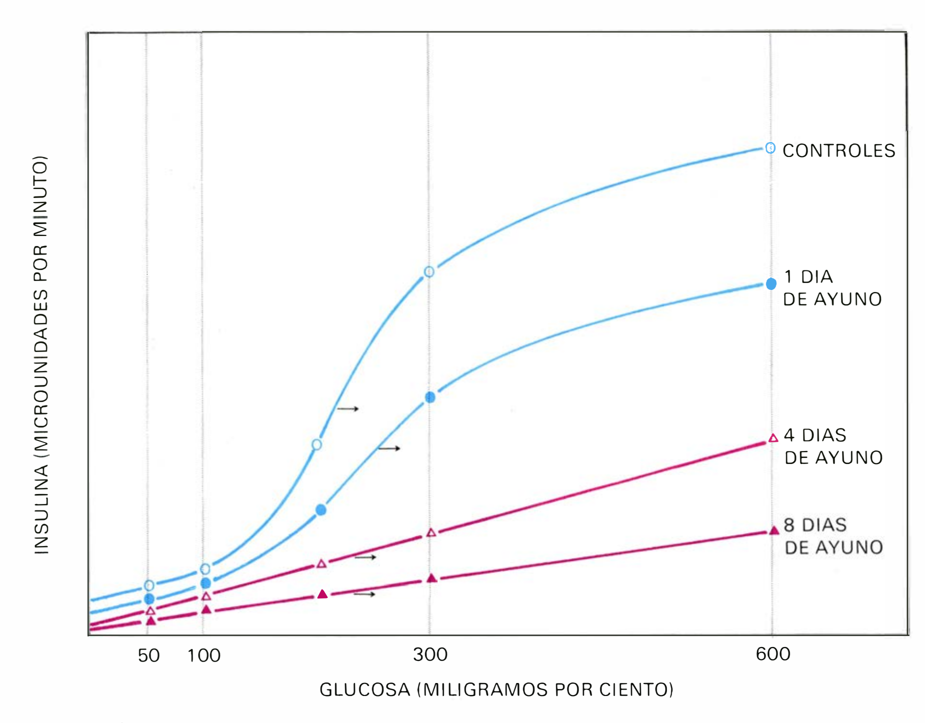
En 1970, Steiner y colaboradores, de la Universidad de Chicago, aislaron un precursor de la insulina, al que denominaron proinsulina. El peso molecular de la proinsulina es de 9000, aproximadamente, y tiene muy poca actividad biológica. Aparece en suero, en pequeña proporción comparada con la insulina (de un 2 a un 4 por ciento). En presencia de enzimas proteolíticos como la tripsina, se rompe la cadena de proinsulina, liberando el péptido de conexión (o C), transformándose en la insulina.

¿Cuáles son los métodos utilizados para el estudio de la secreción de la célula beta? Podemos dividirlos en dos grupos, según estudiemos la secreción "in vivo" o "in vitro".

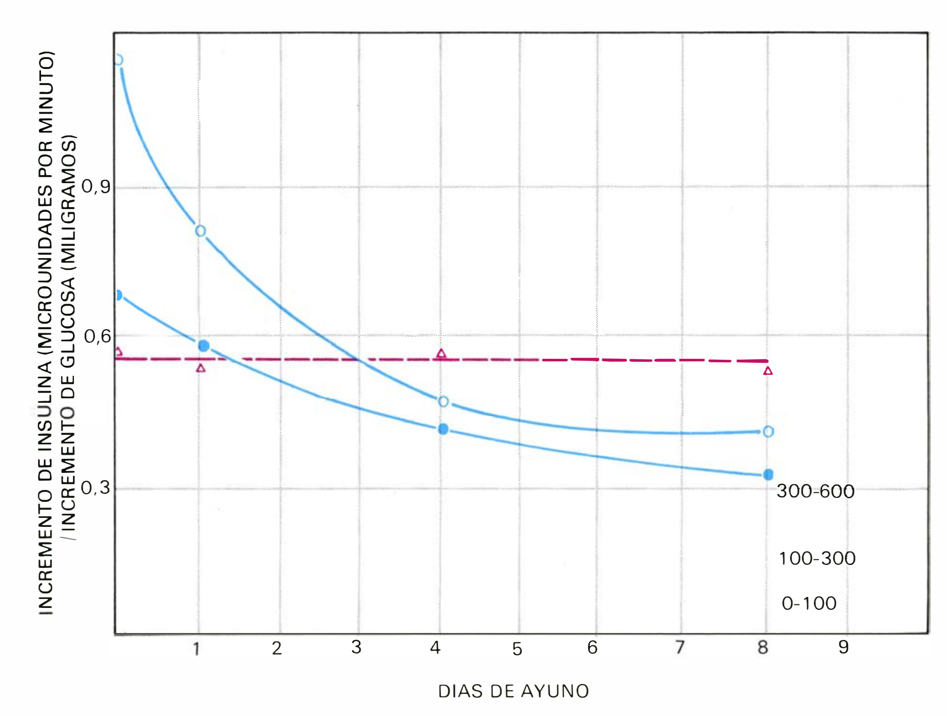
Los estudios "in vivo" presentan la ventaja de poder observar el comportamiento de la secreción en conjunto; pero tienen el inconveniente de que las acciones quedan enmascaradas por los sistemas metabólicos de regulación y contrarregulación. Un dato de interés en el estudio de la secreción de las hormonas es el escaso valor que tienen los niveles basales. Téngase en cuenta, por ejemplo, que una pancreatectomía del 95 por ciento no modifica los niveles basales de insulina circulante. Si, por el contrario, nos valemos de la estimulación mediante la sobrecarga intravenosa de glucosa (0,5 g/kg) en la vena yugular, provocaremos en escasos minutos un ascenso rapidísimo de la secreción, en el caso de un animal normal. Si se trata de un animal pancreatectomizado en un 95 por ciento, el estímulo de la glucosa intravenosa resulta incapaz de provocar la secreción. La diferencia entre ambas curvas de sobrecarga es abismal.

Los estudios "in vitro" tienen la gran ventaja de poder estudiar la secreción con independencia del resto del organismo. Describiremos dos métodos: la perfusión del páncreas aislado y la incubación de islotes. En el primer caso nos hallamos ante un método experimental utilizado para estudiar directamente la secreción de insulina. Consiste en aislar el páncreas de la rata, conservando el marco duodenal, y perfundir a través de los vasos propios mediante un catéter colocado entre la aorta torácica y la abdominal. La recogida del líquido de perfusión se hace por la vena porta. El líquido de perfusión es una solución de Krebs Ringer bicarbonato con albúmina al 1 por ciento oxigenado con carbógeno, mediante un oxigenador de membrana. Una vez aislado, se introduce el páncreas en un aparato que mantiene constantes la temperatura (37,5 grados Celsius), la presión (20-25 mm Hg), el flujo (2,5 ml/min), el *p*H (7,33), la presión parcial de oxígeno, etcétera. Este aparato consta de una bomba peristáltica, un serpentín, un captador de burbujas, un manómetro de mercurio, un infusor, una cámara atemperada para el páncreas y un colector de fracciones.

Mediante este sistema, podemos perfundir durante períodos de dos o más horas, modificando a voluntad la concentración de los solutos que nos interesa someter a prueba. El colector de fracciones puede ser regulado a voluntad para volúmenes o para tiempos. Nosotros habitualmente los regulamos para tiempos de 2 minutos. Así pues, cada tubo o fracción tendrá 5 mililitros de perfundido (2,5 ml/min). Normalmente, en los últimos tubos de la perfusión se infunden catecolaminas. El objetivo es doble. Por una parte, comprobar de inmediato el efecto vasopresor de la adrenalina sobre el páncreas, que registraremos en el manómetro; si no hay respuesta, es muy probable que el páncreas se haya dañado por defecto de la intervención o en la perfusión. Por otra parte, las catecolaminas son potentes inhibido-




**EL AYUNO induce la desaparición de la sensibilidad de la célula *B* entre 100 y 300 miligramos por ciento, transformándose la respuesta de sigmoidea a lineal. Esta transformación es evidente a los cuatro días de ayuno, así como a los ocho días. Tales hallazgos nos hicieron pensar en la existencia de dos mecanismos de secreción de la célula *B*: Uno debido a las concentraciones crecientes de glucosa en el medio, que repercutirán en los niveles intracelulares; el otro sería debido a un transportador de glucosa, llamado glucosensor, responsable de la rama ascendente del sigmoide.**



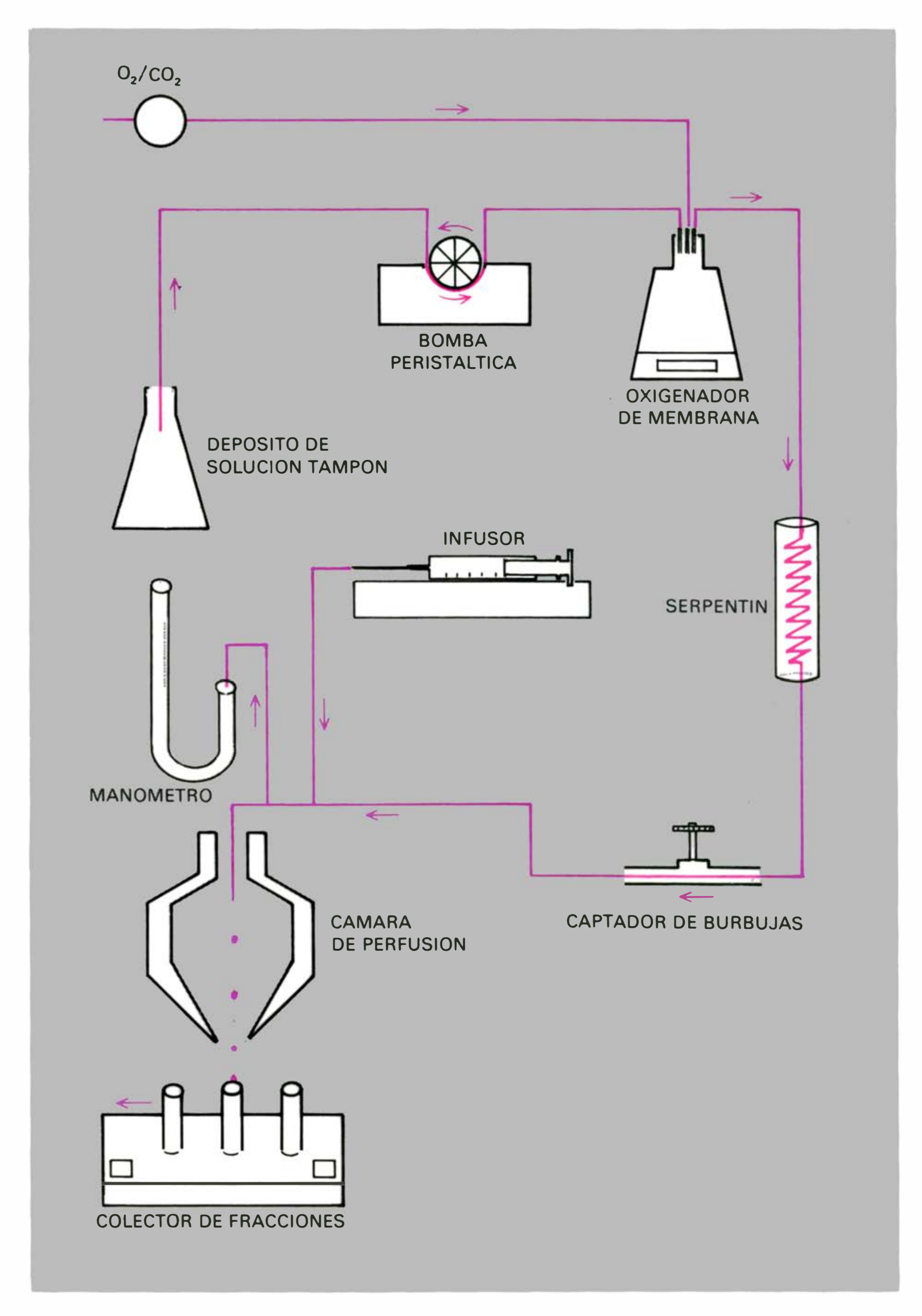

**INFLUENCIA de los períodos de ayuno creciente *(abscisas)* sobre la secreción de insulina, representada como "incremento de la secreción por miligramo de glucosa aumentada en el medio" *(ordenadas)*. Del estudio comparativo de los tres tramos característicos de la curva podemos observar que mientras el ayuno no tiene ninguna influencia en la secreción provocada por glucosa entre 300 y 600 miligramos, la caída es exponencial en concentraciones que oscilan entre 100 y 300.**

res de la secreción de insulina; noción que hay que tener muy en cuenta a la hora de valorar la capacidad de inhibición de la secreción, una vez hayamos medido el radioinmunoanálisis de las hormonas pancreáticas. Después de la perfusión, los tubos se guardan cuidadosamente a –20 grados Celsius hasta el momento de la determinación de insulina y glucagón. De este modo, se puede estudiar la dinámica de secreción de las hormonas insulina y glucagón.

El segundo método estriba en el aislamiento e incubación de islotes. Los islotes de Langerhans pueden aislarse gracias al enzima colagenasa, y siguen manteniendo sus propiedades tras el aislamiento, lo cual nos permite estudiar la secreción de insulina y de glucagón en ausencia del tejido exocrino. Las colagenasas son enzimas que degradan específicamente el colágeno, rompiendo enlaces peptídicos de esta hormona proteica. Se forman en ciertos microorganismos, como el *Clostridium histolyticum,* que es el causante de la gangrena gaseosa. El enlace roto por este enzima bacteriano es el que se halla uniendo un aminoácido cualquiera con el aminoácido glicina en la cadena peptídica de la molécula proteica. Este enzima contribuye a la invasión del clostridio bacteriano, altamente patógeno, mediante la destrucción de las barreras del tejido conjuntivo. Las bacterias no sufren la acción del enzima porque no tienen colágeno.

La cantidad de colágeno utilizada es de 6 a 9 miligramos por páncreas de rata, siendo el tiempo de incubación (con agitación) necesario para el aislamiento de 10 a 12 minutos. El tiempo varía de acuerdo con la actividad del enzima colagenasa: al cambiar el lote de este enzima nos vemos obligados a modificar el tiempo de incubación.

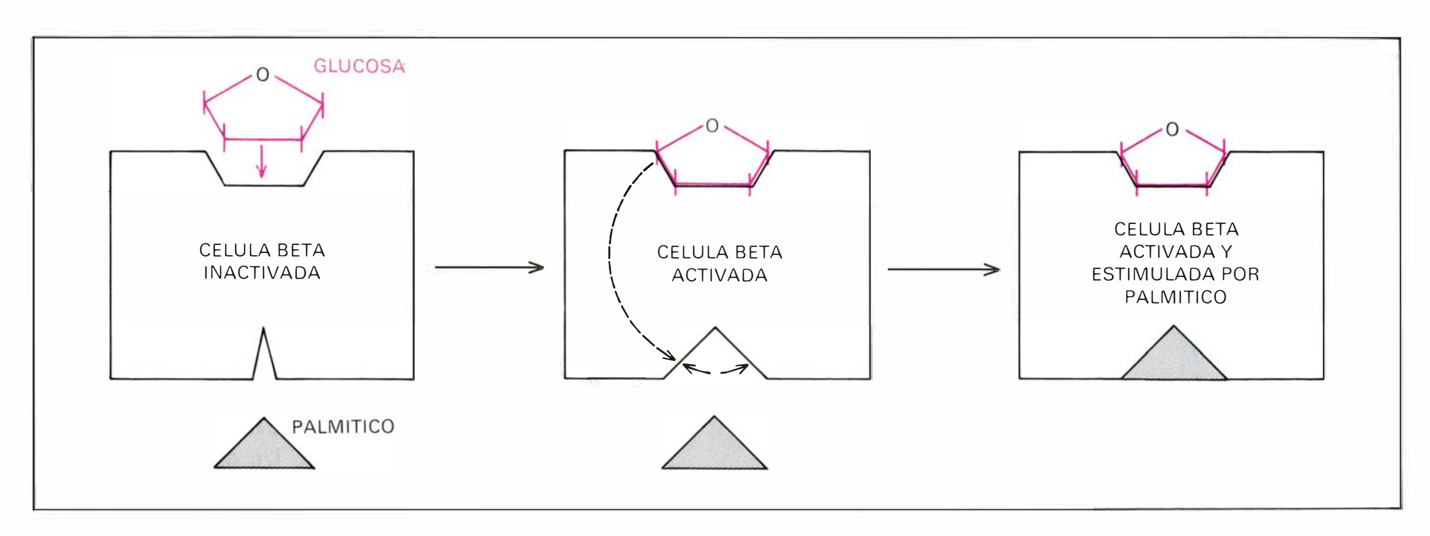
En este momento del proceso, se observa una fracción de la solución con una lupa de microscopio (de 20 aumentos) y fondo obscuro. Se puede visualizar así los islotes con su contorno irregular. Una vez comprobada la digestión, se pescan los islotes, uno a uno, mediante un asa de vidrio o pipeta Pasteur modificada. En cuanto se dispone de un acervo de islotes, se pasa al estudio de la secreción de insulina y glucagón, y ello de dos maneras. Un método consiste en la incubación en un baño de agitación atemperado a 37,5 grados Celsius y oxigenado previamente. El otro consiste en la perfusión mediante una cámara y una bomba peristáltica.




**ESQUEMA DEL APARATO UTILIZADO en la perfusión del páncreas. El páncreas se introduce en la cámara de perfusión que está atemperada a 37,5° C. En líneas rojas se representan los conductos por donde circula la solución tampón utilizada. Las flechas indican el sentido de la corriente. La oxigenación se realiza en un oxigenador de membrana que recibe por una parte carbógeno ($O_2/CO_2$) y por otra el líquido de perfusión. Finalmente, el colector de fracciones, que está programado a tiempos de dos minutos, nos permite estudiar la dinámica de la secreción.**

El inconveniente del aislamiento de islotes de Langerhans con colagenasa radica en su difícil realización, pues en no pocas ocasiones se daña a los islotes. La ventaja es que, para estudios metabólicos, prescindimos del tejido exocrino pancreático, cuya intensa actividad llegaría a enmascarar las reacciones metabólicas de los islotes. Si queremos estudiar la biosíntesis de insulina valorando la incorporación del aminoácido leucina, marcada con tritio ($H_3$), en el caso de utilizar todo el páncreas, la leucina-$H_3$ se incorporará a las células de los islotes (2 por ciento del total del tejido pancreático), mientras que el 98 por ciento lo hará en el tejido exocrino. Dado que la proporción 2/98 no es constante, resulta muy difícil realizar este tipo de estudios. Por el contrario, utilizando sólo islotes obviamos esos problemas, ya que la incorporación de leucina-$H_3$ sólo será posible en las células de los islotes.

La glucosa es el estimulante fisiológico de la secreción de insulina. La célula beta del páncreas tiene un receptor (glucosensor) que es sensible a determinadas concentraciones de glucosa. Cuando se relacionan las concentraciones de glucosa con la respuesta insulínica obtenemos una curva sigmoidea; la respuesta no es, pues, lineal. Si los análisis nos dieran una




**LA GLUCOSA tiene un papel permisivo para que otras substancias sean capaces de estimular la célula beta. En la figura se muestra cómo el palmítico por sí solo es incapaz de estimular la célula beta** *(izquierda)*, **pero una vez adaptada la glucosa a su receptor/transportador** *(centro)*, **el palmítico es capaz de estimular la célula ya activada** *(derecha)* **provocando de este modo la secreción de la insulina. (Ilustración propiedad del autor.)**

respuesta lineal, ello significaría que la secreción de insulina aumenta progresivamente al aumentar la concentración de glucosa en el medio. La respuesta sigmoidea demuestra que la célula beta es muy sensible a determinadas concentraciones de glucosa. Concretamente, el ascenso rápido de la curva de la ilustración superior de la página 94 corresponde a concentraciones de glucosa entre 120 y 300 miligramos por ciento. Por debajo de 120 por ciento de glucosa la respuesta es escasa (valores basales) y por encima de 300 miligramos por ciento el incremento de la secreción es lento.

Este comportamiento alostérico, dependiente de la concentración, de la célula beta con la glucosa se pierde en determinadas circunstancias, como en el caso de ayuno prolongado. A nuestro entender, la respuesta insulínica de la célula beta frente a la glucosa tiene dos mecanismos; uno, dependiente de la concentración de glucosa en el medio (a más glucosa mayor secreción) y, otro, dependiente de una determinada concentración de glucosa (glucosa entre 120-300 miligramos por ciento). El primero nos daría la respuesta lineal; el segundo, la rama ascendente de la curva sigmoidea. Este fenómeno que describimos aquí es semejante a la cinética de los enzimas alostéricos y al comportamiento de la hemoglobina frente al oxígeno (saturación). En efecto, la curva de disociación de la hemoglobina es muy particular. Si representamos la saturación de la hemoglobina por el oxígeno frente a la presión parcial de $O_2$ ($pO_2$) obtendremos una curva sigmoidea, mientras que la mioglobina sigue una curva hiperbólica.

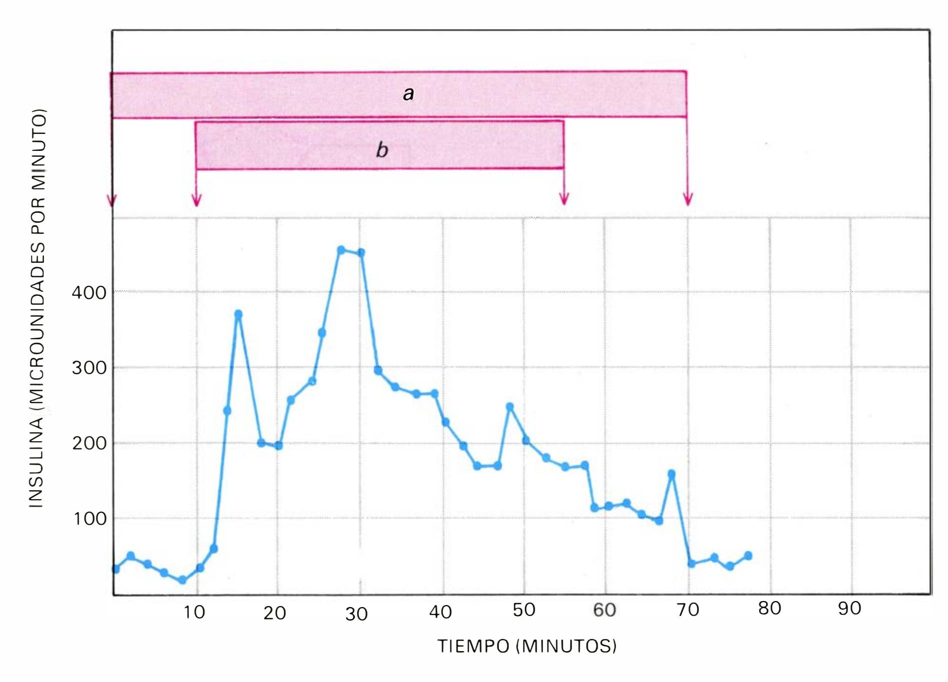
La particularidad de la curva de disociación de la hemoglobina consiste en que, a bajas presiones parciales de $O_2$, tiene mayor afinidad (por el $O_2$) y que, a mayores presiones parciales, esta afinidad disminuye. Ello significa que la hemoglobina está preparada para captar $O_2$ en los alveolos y liberar $O_2$ en los tejidos. También intervienen otros factores como la concentración de $H^+$ y $CO_2$ (el llamado efecto Bohr).

La oxigenación particular de la hemoglobina se debe a un efecto cooperativo entre las cuatro cadenas (protómeros) que constituyen la molécula de hemoglobina (alfa$_2$-beta$_2$). El oxígeno puede desempeñar el papel de regulador de su propia fijación. Es un verdadero proceso de amplificación que asegura una perfecta coordinación entre condiciones del medio y la fijación de oxígeno. En el caso de la célula beta, el mecanismo es por ahora desconocido, pero tenemos razones para pensar que pudiese ser análogo al de la hemoglobina o a ciertos enzimas reguladores, como la fosfofructoquinasa y la aspartatotranscarbamilasa. En cualquier caso de éstos, en lugar de seguir una ley hiperbólica, las curvas de variación de la actividad en función de las concentraciones de sustrato o de efector son sigmoideas.

Por lo que respecta a la hemoglobina, se ha podido atribuir esta propiedad a la presencia de varios emplazamientos de fijación de oxígeno en la molécula. Mientras que en la mioglobina no existe más que un emplazamiento de unión por molécula, hay cuatro (uno por cada grupo hemo) en la hemoglobina. Los cuatro loci para el oxígeno "cooperan" en el sentido de que la fijación de una primera molécula de oxígeno favorece la fijación de las siguientes. En el campo de los enzimas, se han descrito también acciones cooperativas del mismo tipo en enzimas alostéricos como la fosforilasa *b*, la fosfofructoquinasa, la aspartatotranscarbamilasa, la treonina desaminasa y otros.

Cabría pensar que, en la célula beta, la glucosa se uniría a una proteína en varios puntos de fijación. Estos loci cooperarían de modo que la fijación de una primera molécula de glucosa favorecería la unión de las siguientes, dando la curva sigmoidea. Esta proteína podría ser un enzima o una proteína transportadora responsable del proceso de amplificación de la respuesta. Esta hipotética proteína de la célula beta, que manifiesta efectos cooperativos, tendría una estructura oligomérica, constituida por varias subunidades o protómeros, cada uno de los cuales poseería un lugar de fijación para la glucosa. Cada protómero debe existir bajo dos estados conformacionales que difieran en su afinidad hacia la glucosa. Los dos estados conformacionales estarían en equilibrio reversible, pero la unión de los protómeros a la glucosa desplazaría el equilibrio apareciendo entonces las interacciones cooperativas. Tendríamos que admitir, por tanto, un cambio de conformación de la molécula proteica. La unión de la proteína con el efector (glucosa) se acompañaría de una reorganización de la estructura espacial de la molécula.

El año pasado, Shanahan y Czech aislaron una proteína (dos dímeros de peso molecular 200.000) que es la responsable del transporte de la *D*-glucosa en la membrana de los adipocitos de rata. El sistema del transporte purificado conserva las propiedades que tiene en células aisladas (inhibición con florizina, inhibición competitiva con 3-0-metil glucosa, especificidad para la *D*-glucosa y




**DINAMICA DE LA SECRECION DE INSULINA provocada por arginina 5mM** *(b)* **con glucosa 50 miligramos por ciento en el medio de perfusión** *(a)*. **Hay determinados aminoácidos que estimulan la liberación de insulina y de glucagón. La capacidad liberadora de insulina por parte de cada aminoácido varía según la especie. La arginina, en particular, es un potente estimulador de esa secreción.**

ausencia de especificidad para la *L*-glucosa). Esta proteína se aisló gracias al anhídrido dimetilmaleico que reacciona uniéndose, mediante enlaces covalentes, con proteínas de la membrana; posteriormente se comprobó que dichas membranas retienen el sistema que facilita el transporte después de la extracción.

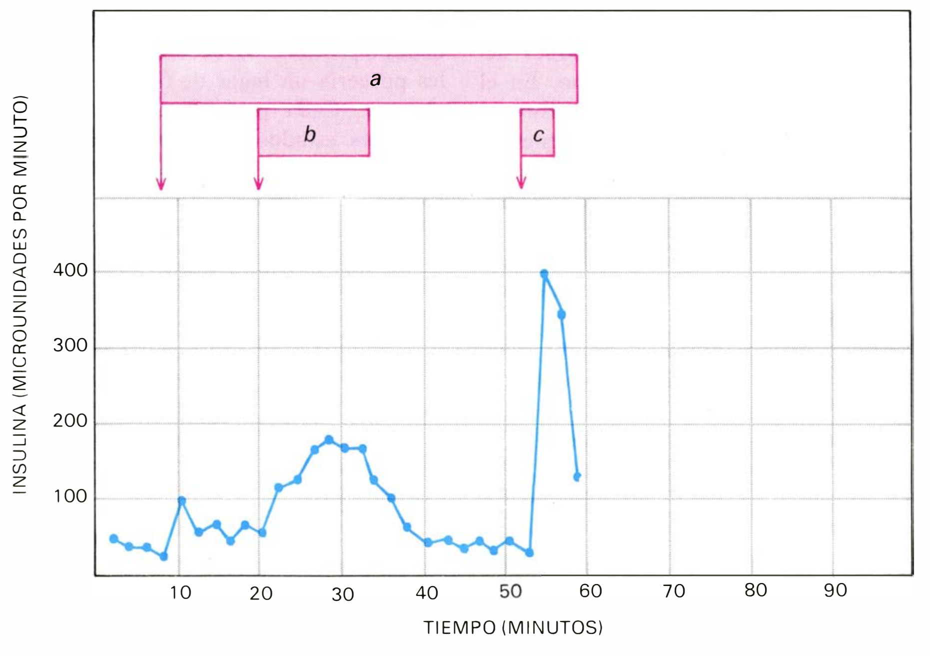
Nosotros hemos observado modificaciones notables de la respuesta sigmoidea en el caso de ayuno prolongado, en experimentos con ratas machos de unos 250-300 gramos de peso y en períodos de ayuno total (agua "ad libitum"), entre 24 horas y 8 días. Utilizamos la perfusión de páncreas aislado y modificamos las concentraciones de glucosa en el medio entre 0 y 600 miligramos por ciento. El número de pruebas medidas para cada grupo ha sido muy elevado (exactamente 336 controles, 180 de cuatro días de ayuno y 192 de ocho días de ayuno). El estudio estadístico no ofrece dudas en cuanto a la significación de los resultados. La respuesta registrada, en el caso de los controles, configura una curva sigmoidea característica, y, en el caso de 4 y 8 días de ayuno, una función menor y lineal.

En el estudio de la curva, podemos decir que a los 4 y 8 días existiría una menor afinidad de la hipotética proteína para la glucosa. Un desplazamiento hacia el eje de ordenadas por el contrario nos hubiese mostrado una afinidad mayor. El ayuno, por tanto, modifica la respuesta con un desplazamiento de la curva a la derecha; pero si nos fijamos en la respuesta a los cuatro y ocho días, veremos que ésta es lineal, siendo la de ocho días inferior a la de cuatro días.

A raiz de estos datos, nos pareció que la sensibilidad de la célula beta (o de la hipotética proteína) era sólo para una determinada concentración de glucosa. En efecto, en la ilustración inferior de la página 95, podemos ver cuál es el comportamiento de la respuesta insulínica en las distintas partes de la curva. En la figura se representa, en abscisas, el período de ayuno y, en ordenadas, el incremento de la secreción de insulina expresada en microunidades por minuto y por miligramo de glucosa aumentada en el medio. Es evidente que, a concentraciones de glucosa entre 100 y 300 miligramos por ciento, conforme aumenta el período de ayuno desciende el incremento de la secreción de insulina (dibuja una hipérbole). Si, por el contrario, estudiamos lo que ocurre a concentraciones de glucosa entre 300 y 600 miligramos por ciento podemos observar que no existen modificaciones durante los distintos períodos de ayuno. De cuyo experimento concluimos que, con el ayuno prolongado, la sensibilidad se pierde sólo entre 100 y 300 miligramos por ciento. Ha desaparecido la rama ascendente del sigmoide, o lo que es lo mismo, el efecto cooperativo de nuestra hipótesis anterior.

La secreción que encontramos entre 300 y 600 se debería al paso de la glucosa a la célula por el aumento de la concentración en el medio, sin tener ningún mecanismo activo del tipo que describíamos para la hemoglobina o los enzimas alostéricos.

Un dato interesante en el estudio de la secreción de insulina es el hecho de que cuando se perfunde con conocidos estimuladores de la secreción, sin glucosa en el medio, no hay respuesta. Hemos



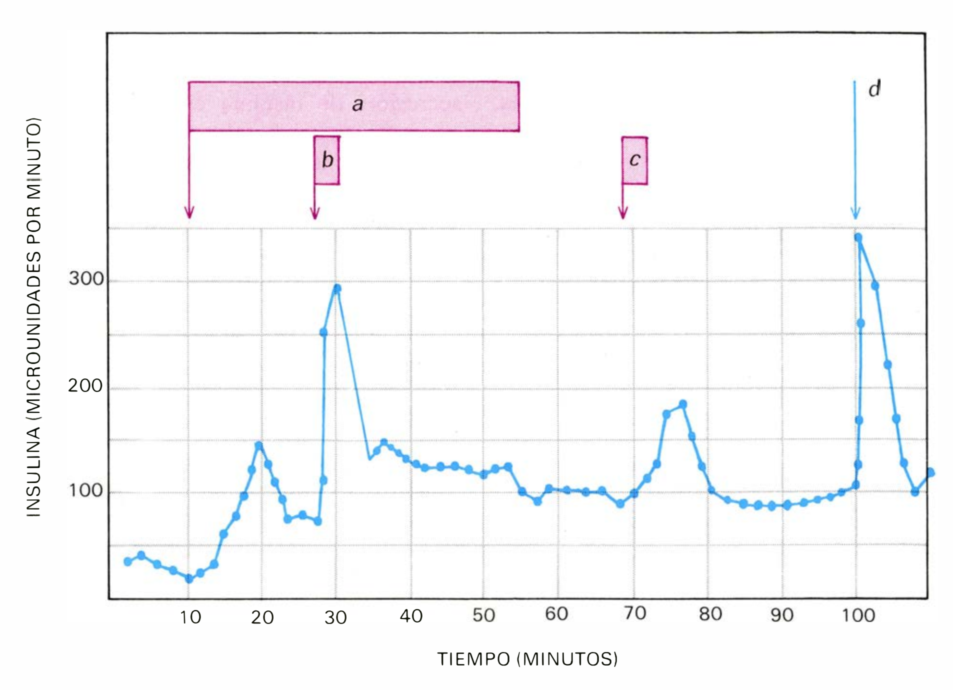

**LOS CUERPOS CETONICOS, como el B hidroxibutirato (7 mM,** *b*) **en presencia de glucosa (5,5 nM,** *a*) **provocan una secreción de insulina monofásica. Al final de la perfusión se administra un pulso de glucosa** *(c)* **para comprobar la reactividad de la célula beta. En efecto, los lípidos pueden modificar también la secreción de insulina "in vitro": los ácidos grasos libres de cadena corta (propionato, butirato y octanato) o larga (palmitato y oleato) y los cuerpos cetónicos, de los que hemos tomado la muestra, estimulan la secreción en concentraciones basales de glucosa.**

realizado estos experimentos en el páncreas aislado y perfundido de rata por tratarse de un diseño experimental que nos permite modificar la concentración de glucosa a voluntad. En una serie de perfusiones se siguió este proceso: durante los 120 minutos que dura la perfusión, la solución tampón utilizada contenía glucosa 100 miligramos por ciento (los niveles habituales en el hombre sano) y entre los minutos 15 y 60 se infundió además una solución de palmitato de albúmina. En estas condiciones, el palmitato de albúmina se mostró como potente estimulador de la secreción. Si realizábamos el mismo ensayo sin glucosa en el medio, el palmitato de albúmina se mostraba incapaz de estimular la secreción de insulina.

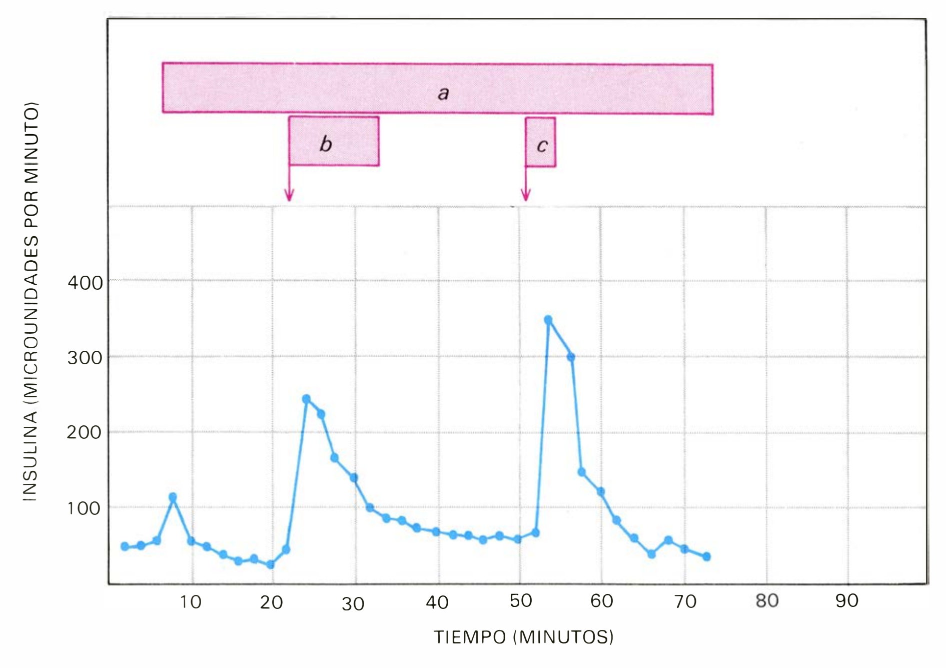
Repetimos puntualmente la misma demostración con otros metabolitos, como el B-0H butirato y el acetoacetato. Estos tres metabolitos necesitan unos niveles mínimos de glucosa en el medio para poder estimular la célula beta. ¿Cómo explicar este fenómeno? Podíamos avanzar dos hipótesis. En primer lugar, la ausencia de glucosa disminuiría la reserva de ATP celular. Pero en contra de esta posibilidad estaba el hecho de que la ausencia de secreción era total, mientras que el ATP, de disminuir su nivel intracelular, lo haría de un modo paulatino. Para la segunda hipótesis, la glucosa, al unirse al glucosensor, modificaría el receptor para el ácido palmítico, de suerte que posibilitaría la unión receptor-palmítico y de este modo desencadenaría la secreción de insulina. Con la glucosa, la célula beta se activa y permite la acción sobre ella de conocidos estimuladores (ácido palmítico, aminoácido arginina, etcétera).

Hemos visto, hasta ahora, que la célula beta es sensible a determinadas concentraciones de glucosa en el medio. Hemos mostrado también que unos niveles basales de glucosa son necesarios para que otros metabolitos puedan provocar la secreción. Tras disponerse en los laboratorios de técnicas sencillas que nos permiten medir, en poco tiempo, gran número de pruebas de insulina y descubrirse sistemas como la perfusión de páncreas y la incubación de islotes que hacen posible testar diversas sustancias en múltiples concentraciones, han venido apareciendo, en los últimos años, multitud de trabajos que revelan acciones estimuladoras o inhibidoras de la secreción de insulina. Efectivamente, se ha podido mostrar un amplio abanico de sustancias, de origen fisiológico o no, capaces de modificar la secreción de insulina. No cabe duda de que la célula beta no es sólo sensible a la glucosa como se pensó en un primer momento, sino que otros metabolitos, hormonas, etcétera, pueden actuar incluso a niveles considerados como fisiológicos. Sin detenernos en un estudio exhaustivo de las posibilidades de estímulos de la célula beta, vale la pena poner de relieve aquellos que, a nuestro juicio, encierran mayor interés fisiológico y farmacológico.

El glucosensor que describíamos antes posee una elevada especificidad hacia determinadas concentraciones de glucosa o azúcares muy similares, como lo apoya el hecho de que, en la rata al me-




**LAS HORMONAS GASTROINTESTINALES, como la pancreozimina *(b)* en presencia de glucosa 5,5 mM *(a)*, aumentan de un modo rápido la secreción. En ausencia de glucosa *(c)* la respuesta es mucho menor. Al final de la perfusión, la glucosa *(d)* demuestra la buena reactividad pancreática. En una perspectiva más amplia, existe un gran número de hormonas, tanto esteroideas como fenólicas y proteicas, capaces de modificar la respuesta de la célula beta, bien por interacción directa o indirecta. La mayoría de los estudios sólo se han realizado a nivel farmacológico.**




**SI EN VEZ DE UTILIZAR la molécula entera de la pancreozimina como veíamos en la ilustración anterior, administramos únicamente el octapéptido terminal de la pancreozimina a dos concentraciones distintas (1 γ/min, *b*) (25 γ/min, *c*) en presencia de 5,5 mM de glucosa *(a)*, podemos ver cómo basta el octapéptido terminal para provocar la secreción. De las hormonas gastrointestinales, la pancreozimina es la de acción más potente y estimula la secreción de glucagón.**

nos, la glucosa y manosa son los estimuladores más potentes de la secreción de insulina, mientras que otros azúcares, como la fructosa y el xilitol, no provocan ningún cambio.

En 1973, comprobamos que la glucosa-1-fosfato y la glucosa-6-fosfato no desencadenaban la secreción de insulina "in vitro". Ambos metabolitos inhibían la liberación de insulina mediada por la glucosa confirmando la idea de que una pequeña modificación estructural podía detectarse por el glucorreceptor. La manoheptulosa, además de inhibir el metabolismo de la glucosa bloqueando su fosforilación a glucosa-6-fosfato, es capaz de inhibir simultáneamente la secreción de insulina mediada por glucosa.

Hay determinados aminoácidos que estimulan la liberación de insulina y de glucagón. La capacidad liberadora de insulina por parte de cada aminoácido varía según la especie; en el hombre, el más potente es la arginina, seguido por la lisina y la leucina.

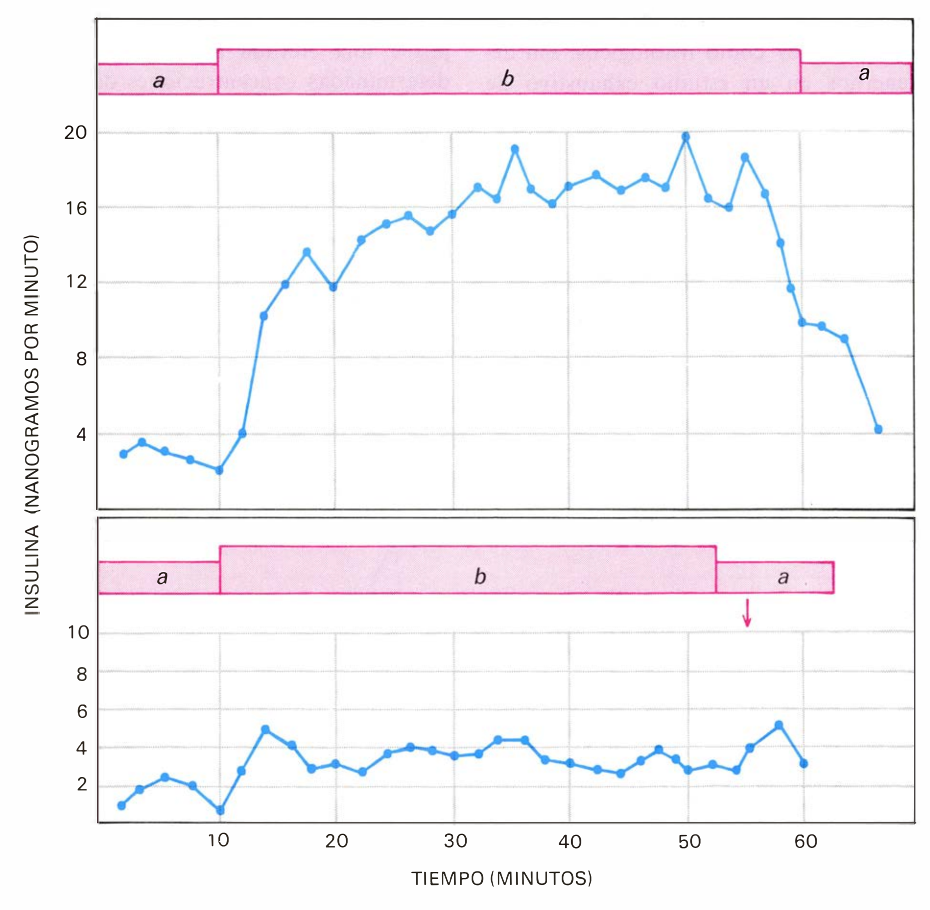
También los lípidos pueden modificar la secreción de insulina por la célula beta "in vitro"; los ácidos grasos libres de cadena corta (propionato, butirato y octanoato) o larga (palmitato y oleato), así como los cuerpos cetónicos (acetoacetato y *B*-hidroxibutirato), estimulan la secreción de insulina en presencia de concentraciones basales de glucosa.

Algo dijimos ya de la acción del palmitato de albúmina en presencia y ausencia de glucosa, como ejemplo del papel permisivo que tienen los niveles basales de glucosa sobre la activación de la célula beta. El *B*-hidroxibutirato (7mM) estimula también la célula beta aunque su acción es menos potente que el palmitato de albúmina. El papel de estos metabolitos en la regulación fisiológica de la liberación de insulina requiere nuevos estudios. Es posible que su función sea asegurar en el ayuno prolongado una liberación mínima de insulina capaz de evitar la gravedad de la cetoacidosis.

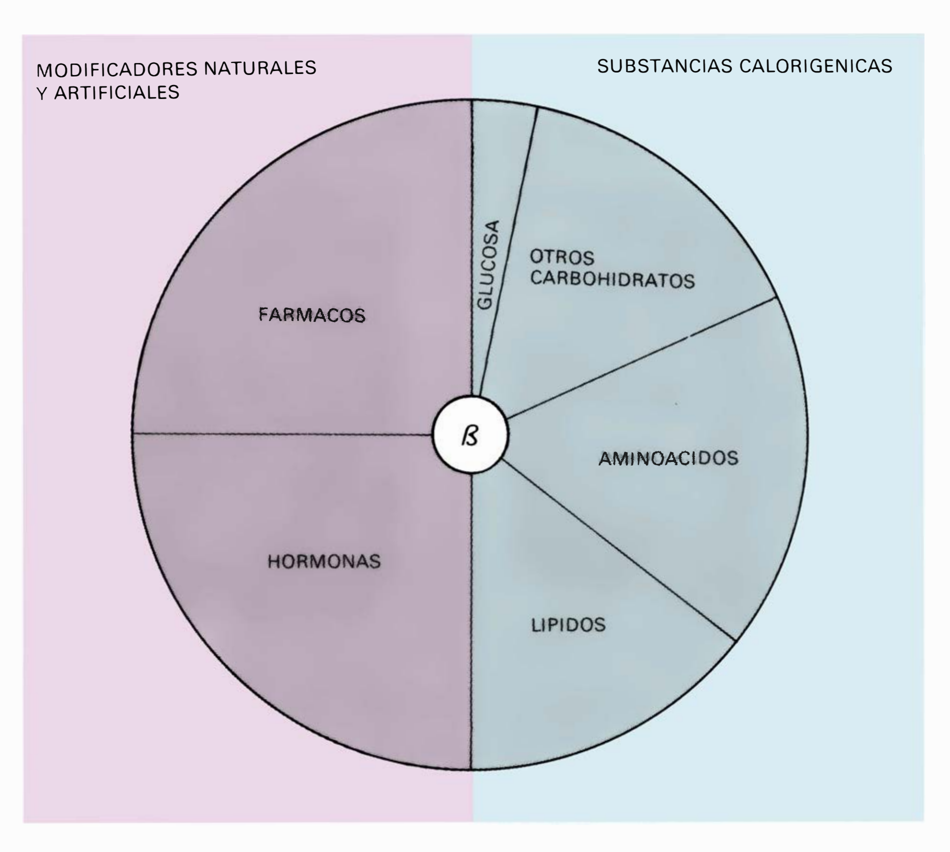
Existe un gran número de hormonas, tanto esteroideas como fenólicas y proteicas, capaces de modificar la respuesta de la célula beta, bien por interacción directa o indirecta. Por desgracia, muchos de los estudios publicados se han realizado a nivel farmacológico, siendo cuestionable, por tanto, la validez de los resultados obtenidos desde un punto de vista fisiológico. Entre las diversas hormonas hipotalámicas conocidas, sólo la somatoestatina (tetradecapéptido) inhibe potentemente la secreción de insulina "in vivo" e "in vitro". Aunque desconocemos el mecanismo de acción, debemos destacar dos hechos: en primer lugar, los islotes de Langerhans también segregan somatoestatina y, en segundo lugar, 2 nanogramos por mililitro son niveles fisiológicos circulantes para muchas hormonas. Con estas dos premisas no es extraño pensar que la somatoestatina tenga un papel regulador a nivel de los islotes de Langerhans. Las hormonas hipofisarias ACTH (adrenocorticotropinas) no tienen acción directa sobre los islotes de Langerhans. La administración "in vivo" de estas hormonas, a dosis farmacológicas, modifica la secreción por un mecanismo indirecto. Asimismo, las hormonas tiroideas $T_3$ y $T_4$ carecen de efecto directo sobre los islotes.

La calcitonina es capaz de inhibir la segunda fase de la secreción de insulina mediada por la glucosa. Posiblemente esta acción sea debida a la acción de dicha hormona sobre el $Ca^{2+}$. De hecho, está firmemente establecido que la omisión del $Ca^{2+}$ extracelular anula la secreción de insulina mediada por glucosa y otros agentes insulinotropos "in vitro". Por el contrario, la acumulación de este catión en el citoplasma de la célula beta provoca la liberación de insulina activando un sistema contráctil compuesto de microtúbulos, causante de la expulsión del gránulo beta. De cualquier modo, no podemos considerar únicamente dos compartimientos para el $Ca^{2+}$ (el extracelular y el intracelular). Dentro de las células hay varios compartimientos con niveles de calcio diversos. Baste recordar aquí que, en la membrana interna de la mitocondria, por un proceso alternativo de la fosforilización oxidativa, se pone en marcha un sistema de transporte activo capaz de almacenar $Ca^{2+}$ intramitocondrial.

Otras hormonas que también parecen tener un papel fisiológico en la función de los islotes de Langerhans son las gastrointestinales. Es bien conocida la observación de que tanto la glucosa como los aminoácidos provocan una insulinoliberación mayor cuando se administran por vía oral que cuando se inyectan por vía intravenosa. Este efecto se debe a la liberación en la mucosa intestinal de una o varias hormonas gastrointestinales que por vía hemática modificarían la secreción de la célula beta. De todas las hormonas gastrointestinales, la pancreozimina es la de acción más potente, estimulando igualmente la secreción de insulina y glucagón. Estudiando la relación estructura-función, observamos que el




**PERFUSIONES DE PANCREAS mostrando la secreción de insulina con dos concentraciones de glucosa: 50 miligramos por ciento *(a)* y 300 miligramos por ciento *(b)*. En la parte inferior de la ilustración, el período *b* contiene además somatoestatina (2 nanogramos por mililitro), siendo evidente la potente inhibición de la secreción de insulina provocada por esta hormona hipotalámica.**




**LA CELULA BETA no sólo es sensible a la glucosa; otras substancias calorigénicas (lípidos y aminoácidos), así como hormonas y determinados fármacos, pueden modificar su propia secreción.**

octapéptido terminal sintético de la pancreozimina tiene la misma acción que la molécula intacta.

En 1970, con el fin de relacionar la función exocrima y endocrina del páncreas, realizamos una serie de ensayos con hormonas gastrointestinales en animales que habían sufrido una atrofia del páncreas exocrino por ligadura de los conductos excretores pancreáticos. En estas condiciones, la hormona secretina aumentaba notablemente la secreción de insulina en los controles y no en los animales con insuficiencia pancreática exocrina. Los animales no eran diabéticos, puesto que la administración de glucosa al final de la experiencia aumentaba igualmente la secreción de insulina en los dos grupos. Quedaba claro que la ausencia de páncreas exocrino modificaba la acción de la secretina sobre los islotes de Langerhans.

Las hormonas esteroideas tampoco tienen una acción directa sobre la función de los islotes, pero el tratamiento con dosis farmacológicas de esteroides modifica (del mismo modo como ocurría con las hormonas hipofisiarias) la función de los islotes. Si se estudian morfológicamente los islotes de animales sometidos a un tratamiento prolongado con esteroides, se observa una hipertrofia; si a estos animales se les provoca la secreción con una sobrecarga de glucosa, responden con un hiperinsulinismo.

La serotonina es un potente inhibidor de la secreción de insulina "in vivo" e "in vitro". Se ha localizado serotonina en los propios islotes. Por último, las prostaglandinas (que son un grupo de sustancias químicamente relacionadas y de acción parecida a la de las hormonas) alteran la secreción de insulina, quedando sin confirmar si su vía de actuación es directa (posible liberación de AMPc) o indirecta por la liberación de las catecolaminas.

Tanto el sistema nervioso simpático como el parasimpático son capaces de modular el páncreas endocrino. Se han identificado en la periferia de los islotes terminaciones adrenérgicas y colinérgicas. La noradrenalina y la adrenalina se muestran como potentísimos inhibidores de la secreción de insulina. En nuestro modelo de perfusión de páncreas, administramos, sistemáticamente en los últimos minutos, catecolaminas por dos motivos. En primer lugar para comprobar la reactividad vascular y el aumento de la presión en el páncreas, que detectamos por el manómetro que describíamos en el aparato de perfusión. Si se eleva considerablemente la presión estamos ante una respuesta normal (pasa de 20 a unos 80 mm Hg). Si, por el contrario, no aparece aumento alguno de la presión o el aumento es discreto, quizá se deba a que, en la inter-

vención quirúrgica, hemos dañado algún vaso y el líquido de perfusión se escapa por allí.

En segundo lugar, al medir las hormonas en los tubos correspondientes a la infusión con catecolaminas, será obligado encontrar una inhibición de la secreción insulínica. La caída de los niveles de insulina son tan grandes y constantes, que podemos calificar estos descensos de dramáticos. La acetilcolina, por el contrario, incrementa la secreción de insulina, anulándose este efecto por la atropina. La acción fisiológica que "in vivo" pueda representar tanto el sistema simpático como el parasimpático no está aclarada, si tenemos en cuenta que "in vitro", con el páncreas denervado, los islotes responden normalmente a toda clase de estímulos tanto excitatorios como inhibitorios.

Existen fármacos capaces de lesionar irreversiblemente las células beta; entre la estreptozotozina. Utilizándolos se puede conseguir una diabetes experi-
puede conseguir una diabetes experi-
mental. El diazóxido inhibe potentemente la secreción y no la síntesis. La sulfonilureas son un grupo de sustancias que estimulan la secreción de insulina, utilizándose en el tratamiento de determinados tipos de diabetes en humanos.

No cabe duda de que la *D*-glucosa es el principal regulador de la secreción de insulina. Sin embargo, si se consideran los múltiples factores analizados que inciden en la función secretora de los islotes de Langerhans, no puede menos que afirmarse que el papel de la glucosa constituye sólo un aspecto relativamente pequeño. También es cierto que la mayoría de los metabolitos que son capaces de provocar la secreción necesitan la presencia de unos niveles basales de glucosa (papel permisivo).

Quedan muchas lagunas en el conocimiento del mecanismo de secreción. Es muy probable la existencia, en la célula beta, de un glucorreceptor sensible a determinadas concentraciones de glucosa. Este glucosensor determinaría la afinidad de la glucosa para con el mecanismo responsable de la secreción de insulina. La afinidad glucosa-receptor podría modificarse en algunas circunstancias, tales como el ayuno. Nuestros conocimientos actuales sobre la sensibilidad de la célula beta permiten pensar que próximamente será posible disponer de técnicas para el aislamiento del glucorreceptor. Los esfuerzos futuros en este campo de la investigación deberán estar orientados al descubrimiento de los mecanismos de secreción.

# Juegos matemáticos

## *Música blanca y música parda, curvas fractales y fluctuaciones del tipo 1/f*

Martin Gardner

"Pues cuando no hay palabras (que acompañen la música) es muy difícil reconocer el significado del ritmo y la armonía, o apreciar si con ellas se está imitando algún objeto digno de atención."
–Platón, *Leyes,* Libro II

Platón y Aristóteles coincidieron en afirmar que, hasta cierto punto, todas las bellas artes, música incluida, imitan la naturaleza. Desde sus tiempos, y hasta fines del siglo XVIII, la noción de "imitación" ha ocupado lugar predominante en la estética occidental. Sin duda es fácil comprender en qué sentido es "representación" la pintura o escultura figurativa, o de qué forma "copian" a la vida la literatura o las artes escénicas; pero, ¿en qué sentido puede decirse que la música "imita"?

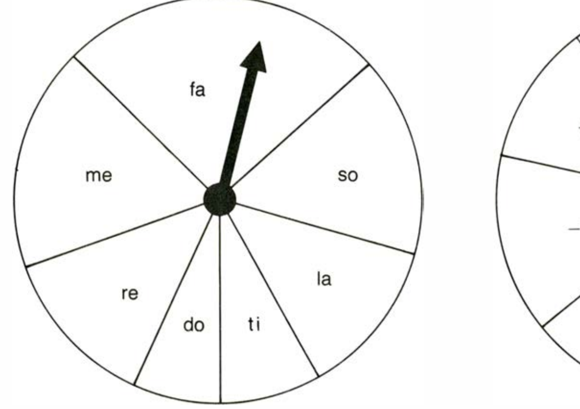
Todavía a mediados del siglo XVIII discutían filósofos y críticos respecto del modo preciso en que las artes imitaban, y si el concepto de imitación era pertinente en música. Podría decirse que los ritmos musicales imitan ritmos naturales, como el cardíaco, el de la marcha, la carrera, el batir de alas de los pájaros, el ondear de las aletas de los peces, el ritmo de las olas, de los movimientos de los cuerpos celestes, etcétera. Pero nada de ello explica por qué gozamos más escuchando música que con el canto de las cigarras o el tic-tac de los relojes. El placer de la música depende mucho de los motivos tonales, y la naturaleza, si bien ruidosa, está singularmente desprovista de tono. Ocasionalmente, al soplar el viento sobre algún objeto se produce una nota, y lo mismo puede ocurrir con el maullido de los gatos, los trinos de los pájaros, o el tañer la tensa cuerda de un arco. Una leyenda griega explica cómo Hermes inventó la lira: encontró un caparazón de tortuga que todavía tenía los tendones del animal ligados al mismo y observó que al pulsarlos emitían notas musicales.

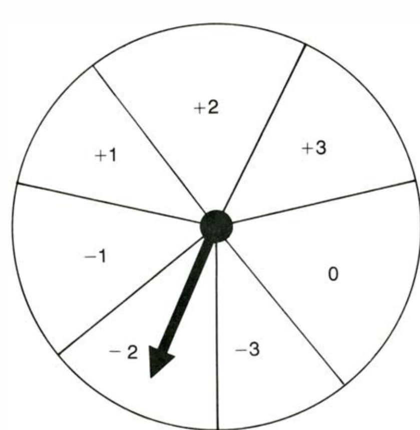
Por encima de todos, los seres humanos cantan. Se puede decir que los instrumentos musicales imitan el canto, pero el canto, ¿qué es lo que imita? Una canción triste, o feliz, o airada o serena recuerda de algún modo la tristeza, la felicidad, el enojo o la calma; pero si una melodía no tiene letra y no invoca ningún estado de ánimo especial, ¿de qué copia? Es fácil comprender la perplejidad de Platón.

Hay una excepción: el tipo de imitaciones que se ejecutan en la llamada "música de programa". La posibilidad de imitar sonidos naturales con una lira es muy limitada, pero no ocurre lo mismo en la música sinfónica o electrónica. La música de programa no tiene dificultad en recrear los sonidos del trueno, del viento, del fuego, de las olas del océano, o el murmullo del arroyo; el canto de los pájaros (especialmente populares han sido el canto del cuco y el graznido del cuervo), el croar de las ranas, la andadura de los animales (el atronador ruido de cascos en *La Cabalgata de las Walkyrias,* de Wagner), el vuelo de los moscardones la rodadura de los trenes, el estrépito de los martillos; el avanzar de los soldados, el choque de los ejércitos, y otros sonidos del campo de batalla. En *Slaughter on Tenth Avenue* (Matanza en la Décima Avenida) hay un disparo de pistola y el aullido de la sirena de un coche de policía. En *La Pasión según San Mateo,* de Bach, puede oírse el terremoto y el desgarrarse del velo del templo. En la *Sinfonía de los Alpes* de Ricardo Strauss, las esquilas de las vacas se imitan agitando esquilas. Strauss insistía en que cierto personaje femenino del *Don Juan* de Felix Mottl tenía el pelo rojo, y en una ocasión llegó a decir que algún día la música podría distinguir entre el tintineo de cucharas y el de tenedores.

La imitación de tales sonidos es sin duda uno de los más triviales aspectos de la música, aun cuando ésta acompañe a ópera, ballet o cine. Además, tales ruidos para nada intervienen en la "música absoluta", música que no tiene la pretensión de describir nada. Un filósofo platónico podría aducir que la música abstracta imita las emociones, o la belleza, o la divina armonía de Dios, o de los dioses; pero desde más mundanas perspectivas, la música es la menos imitativa de las artes. Incluso las pinturas no figurativas recuerdan ciertos motivos de la naturaleza; pero la música no descriptiva a nada se parece, salvo a sí misma.

Desde comienzos de siglo, casi todos los críticos han coincidido en afirmar que se han dado tantos significados al término "imitación" (casi todos ellos pueden encontrarse en Platón) que este concepto se ha convertido en inútil sinónimo de "parecido, semejanza". Al precisar su significado en literatura o en las artes visuales, su sentido es evidente y trivial. Pero al emplearlo en música, su significación resulta demasiado ambigua e imprecisa para ser de ninguna utilidad. Este mes echaremos un vistazo a un sorprendente descubrimiento realizado por Richard F. Voss, joven físico nacido en Minnesota, que se incorporó al Centro de Investigación Thomas J. Watson de la International Bussiness Machines Corporation tras doctorarse en la Universidad de California en Berkeley, bajo la dirección de John Clarke. No es probable que su trabajo




*Ruedas de la fortuna para obtener música blanca* (**izquierda**) *y música parda* (**derecha**)

devuelva el término "imitación" al léxico de la crítica musical, pero en cambio sugiere un curioso modo en el que la buena música puede reflejar una sutil propiedad estadística del mundo.

Las nociones clave subyacentes al trabajo de Voss son las que matemáticos y físicos llaman "densidad espectral" (o espectro de potencias) y "autocorrelación" de una magnitud variable. Ambas nociones son profundas, muy técnicas, y de difícil comprensión. Benoît Mandelbrot, quien también pertenece al Watson Research Center, y en cuyos trabajos recientes se utilizan extensamente las nociones de densidad espectral y autocorrelación, ha sugerido un método de evitar su manejo aquí. Supongamos que la grabación magnetofónica de un sonido sea reproducida más rápida o más lentamente que lo normal. Se puede esperar que el carácter del sonido cambie considerablemente. Por ejemplo, un violín ya no sonaría como un violín. Hay, sin embargo, una clase especial de sonidos cuyo comportamiento es muy diferente. Si se reproduce una grabación de tal sonido a velocidad diferente, basta ajustar el volumen para conseguir que suene exactamente igual que antes. Mandelbrot llama a tales sonidos "ruidos en escala".

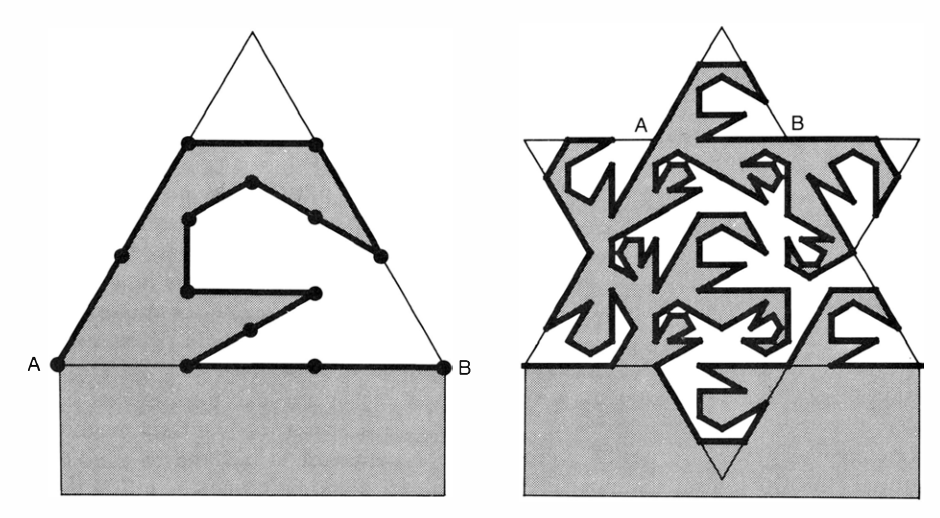
El más sencillo ejemplo de ruido en escala es llamado, en electrónica y en teoría de la información, "ruido blanco" y también, "ruido de Johnson". Ser blanco es no tener color. El ruido blanco es un siseo incoloro, igualmente monótono e invariable reproduciéndolo más rápida o más lentamente. Su función de autocorrelación, que mide cómo están relacionadas sus fluctuaciones en cada instante con las fluctuaciones anteriores, resulta idénticamente igual a cero. El ruido blanco que se encuentra con más frecuencia es el ruido de origen térmico producido al moverse aleatoriamente los electrones que atraviesan una resistencia eléctrica. Dicho ruido es causa de casi todos los "estáticos" que se reciben en una radio o amplificador y de la "nieve" que llena las pantallas de televisión y radar cuando no hay señal de entrada.

Mediante dispositivos de creación de azar, como dados, ruletas, ruedas de la fortuna, etcétera, es fácil generar ruido blanco, que puede después utilizarse para componer una melodía "blanca" aleatoria, en la que no hay correlación entre dos notas cualesquiera. Nuestra escala será una octava de siete teclas blancas del piano: do, re, mi, fa, sol, la, si. Fa será nuestra frecuencia central. Construyamos ahora una aguja de la suerte, como la mostrada en el lado izquierdo de la ilustración de la página anterior. Dividamos el círculo en siete sectores que llamaremos con los nombres de las notas musicales. No importa en absoluto las longitudes de los arcos asignados a tales sectores, que pueden ser completamente arbitrarios. En la rueda de la fortuna que allí se muestra se ha impuesto un cierto orden dándole a "fa" el arco más largo (máxima probabilidad de resultar elegida) y asignándoles probabilidades decrecientes a los pares de notas situadas a igual distancia por arriba y por abajo de "fa". Este proceder tiene el efecto de agrupar las notas en torno a "fa".

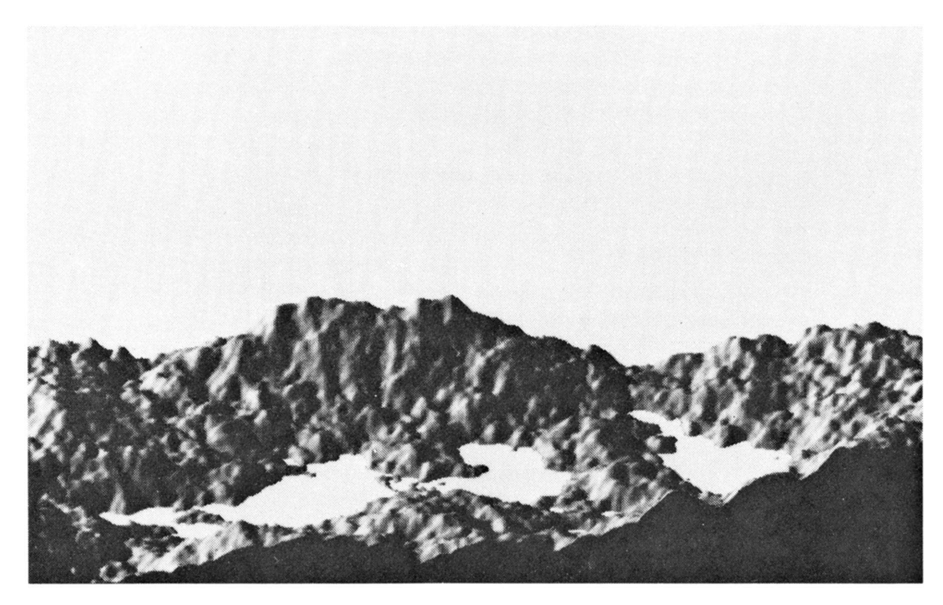
Para producir una melodía blanca se hace girar la rueda de la fortuna tantas veces como se desee, anotándose cada vez la nota resultante. Dado que ninguna nota guarda relación alguna con la sucesión de notas que la precede, el resultado es una sucesión de notas totalmente incorrelacionada. Si se desea, se puede dividir el círculo en más partes y hacer que la aguja vaya seleccionando notas de toda la gama del piano, lo mismo teclas blancas que negras.

Para que la melodía blanca sea más compleja se puede usar una segunda rueda, cuyo círculo se divide en cuatro partes (con las proporciones relativas que se prefieran) rotulándolas 1, 1/2, 1/4 y 1/8, con lo que se podrá asignar a cada nota un tiempo completo, o la mitad, o la cuarta u octava parte. Una vez terminada la composición podemos tocarla al piano. La música sonará exactamente como lo que es: una tediosa salmodia aleatoria, que podría producir un mono o un niño de dos años a base de aporrear las teclas del piano con un solo dedo.

Un tipo más complicado de ruido en escala es el a veces llamado ruido brow-




*Las dos primeras etapas de la construcción de la curva de Peano en copo de nieve creada por Benoît Mandelbrot*



*Paisaje browniano generado mediante un programa de computador preparado por Richard F. Voss*

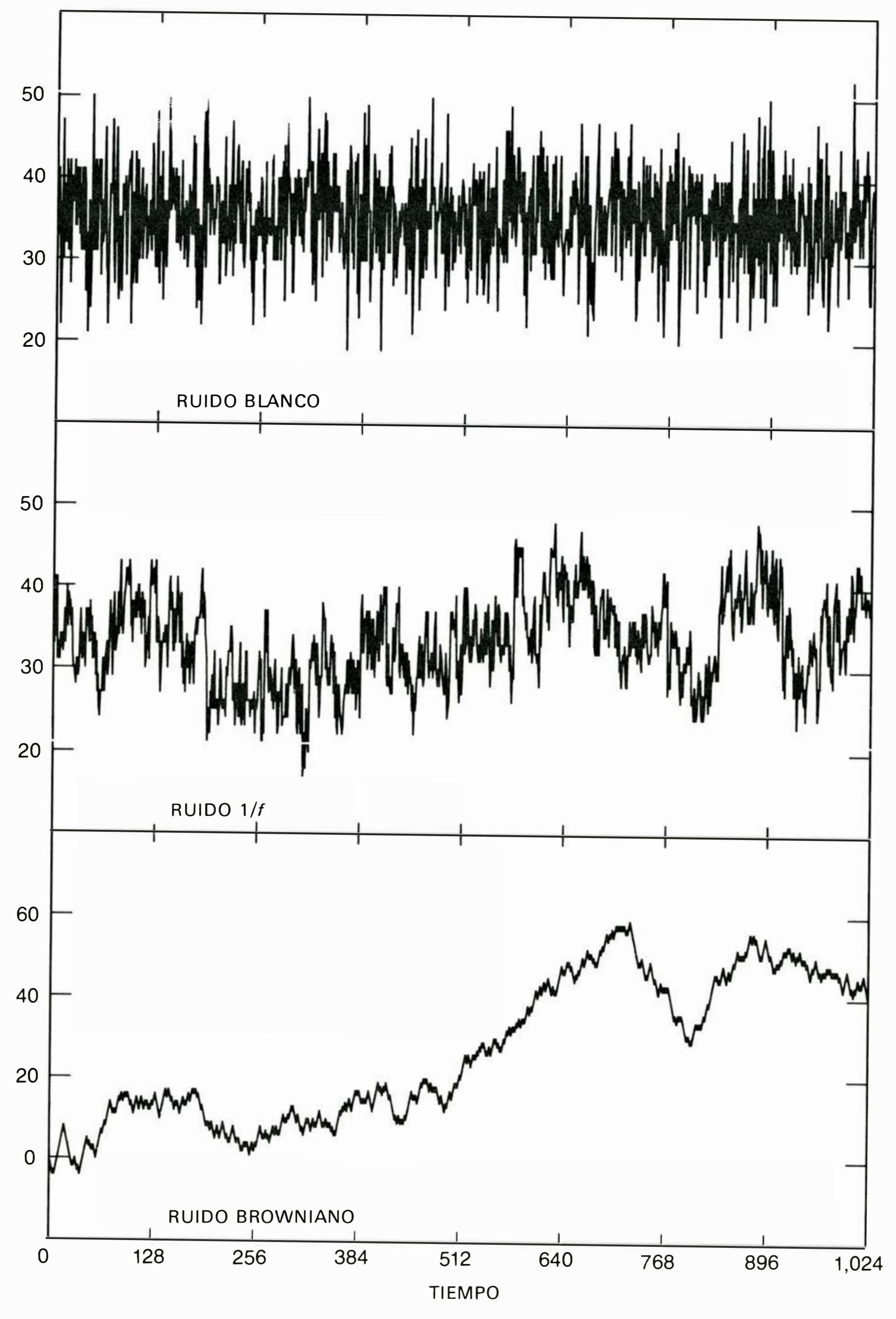
niano, por ser característico del movimiento browniano, movimiento aleatorio de pequeñas partículas en suspensión en líquido provocado por los trompicones de las moléculas en agitación térmica. Cada partícula efectúa un "paseo aleatorio" tridimensional, cuyas sucesivas posiciones forman una serie de elevada correlación. Por así decirlo, la partícula "recuerda" siempre dónde estuvo anteriormente.

Cuando los tonos sonoros fluctúan de esta manera diremos, siguiendo a Voss, que el sonido es música browniana, o simplemente, música "parda" (brown music) [brown music" y no "Brown music", es decir, "música parda" y no "música de Brown". El juego de palabras no tiene traducción equivalente exacta ]. Podemos producirla fácilmente con una rueda de la suerte cuyo círculo esté, como antes, dividido en siete partes, aunque ahora rotularemos las regiones de forma que en lugar de notas representen intervalos entre dos notas sucesivas de la melodía. El tamaño de los intervalos, y su probabilidad, puede ser el que se prefiera. Con la ruleta de la figura, un más significa avanzar una, dos o tres notas en la escala musical, y un menos significa un descenso de la misma magnitud.

Se comienza la melodía en el do central del piano, y después se utiliza la ruleta para generar un paseo aleatorio arriba y abajo del teclado. La tonada irá errando de acá para allá y, eventualmente, se saldrá del teclado. Si consideramos que los extremos del teclado actúen como "barreras de absorción", la tonada acaba al tropezar con alguna de ellas. No es preciso que nos detengamos a explicar cómo podrían transformarse las barreras en barreras reflectantes, que permiten que la melodía rebote, o en barreras elásticas. Para conseguir barreras elásticas es necesario introducir reglas nuevas, de forma que cuanto más se separe la nota del do central tanto mayor sea su probabilidad de retornar al do, lo mismo que una bola al rodar por un canalón curvo puede ir oscilando de lado, pero cada vez con menor amplitud.

Lo mismo que antes, podemos hacer más compleja nuestra música parda modificando la duración de las notas. Si se desea, podemos hacerlo también de modo browniano usando otra ruleta para determinar no la duración, sino el incremento o decremento de la duración de cada nota; otro paseo aleatorio, pero por distinta calle. Resulta así una tonada que suena muy diferente de la melodía blanca, debido a su fuerte correlación, aunque sigue siendo una tonada de muy escaso atractivo estético. Se limita a ir arriba y abajo, como un borracho en una estrecha callejuela, sin producir nunca nada parecido a buena música.

Si se desea una solución intermedia entre los extremos blanco y pardo, hay dos métodos esencialmente diferentes de conseguirlo. El método elegido hasta ahora por los compositores de "música estocástica" consistía en adoptar reglas de transición, que son reglas que van seleccionando las notas basándose en las tres o cuatro últimas. Por ejemplo, se puede analizar la música de Bach y determinar con cuánta frecuencia una determinada nota sigue consecutivamente a, pongamos por ejemplo, un cierto tresillo. La selección aleatoria de cada nota puede entonces ponderarse con la distribución de probabilidades deducida de un análisis estadístico de todos los cuadrupletas –sucesiones de cuatro notas– de Bach. Si ciertas transiciones nunca aparecen en la música de Bach, se añaden reglas de rechazo para prohibir las transiciones indeseables. Resulta así una música aleatoria que recuerda a Bach, pero sólo someramente. Suena como la de Bach en fragmentos cortos, pero a la larga se aprecia su carácter aleatorio. Si se examina la melodía en fragmentos de cuatro o cinco notas se encuentran fuertes correlaciones tonales, pero comparando una serie de cuatro o



*Aspecto típico del ruido blanco, 1/***f***, y browniano*

cinco notas con otra serie suficientemente posterior de la misma longitud se retorna al ruido blanco. Ninguna correlación existe entre las dos series. Casi toda la música estocástica producida hasta ahora pertenece a esta categoría. Suena musicalmente si se escucha algún breve pasaje, pero gratuita y accidental, carente de interés, cuando se intenta captar la estructura del conjunto.

La perspicaz intuición de Voss consistió en buscar una solución intermedia entre las entradas blanca y parda seleccionando para ello un ruido en escala exactamente a medio camino entre ambas. En la terminología del análisis espectral se llama ruido $1/f$. (El ruido blanco tiene una densidad espectral $1/f^0$, y el ruido browniano, una densidad de $1/f^2$. En el ruido "1 entre $f$" el exponente de $f$ es igual, o muy cercano, a 1.) Las melodías basadas en el ruido $1/f$ tienen una moderada correlación, no solamente en fragmentos cortos sino a través de pasajes de cualquier tamaño. Con el resultado de que casi todos los oyentes manifiestan que tal música es mucho más agradable de escuchar que las músicas blanca o parda.

El ruido $1/f$ es bien conocido en electrónica, aunque no haya sido comprendido a fondo. Se le llama también ruido de trémolo ("flicker noise"). Mandelbrot, cuyo libro *Fractals: Form Chance and Dimension* (W. H. Freeman and Company, 1977) es ya un clásico moderno, fue el primero en reconocer hasta qué punto se encuentra extendido en la naturaleza el ruido $1/f$, y ello sin contar la física. Descubrió, por ejemplo, que los datos estadísticos sobre las anuales crecidas del Nilo forman una sucesión de fluctuación $1/f$. También ha investigado la relación entre las curvas que representan gráficamente tales fluctuaciones y las *fractales*, término inventado por él mismo. Una fractal invariante por cambios de escala puede definirse groseramente como una configuración geométrica (aparte de las rectas, planos y superficies euclídeas) que posee la notable propiedad de presentar siempre el mismo aspecto por muy de cerca que se la examine, lo mismo que un sonido en escala suena de la misma forma al reproducirlo más rápida o más lentamente que lo normal. Mandelbrot acuñó el término "fractal" porque le asigna a cada una de estas curvas una dimensión fraccionaria mayor que su dimensión topológica.

Entre las fractales que hacen gala de fuerte regularidad topológica, las más conocidas son las curvas de Peano, que llenan completamente una región finita, y la hermosa curva en "copo de nieve" descubierta en 1904 por el matemático sueco Helge von Koch. El "copo" de Koch aparece en la portada de este número formando la frontera del obscuro "mar" que rodea el motivo central. (Pueden verse más detalles sobre la construcción del copo de nieve en *Investigación y Ciencia*, febrero de 1977.)

La parte más interesante de la cubierta es la curva fractal que forma el diseño central. Ha sido descubierta muy recientemente por Mandelbrot, quien ha permitido a *Scientific American* e *Investigación y Ciencia* su publicación por vez primera. Trazando la frontera entre las regiones roja y blanca, desde el ápice de la punta de la estrella situado en la parte inferior izquierda hasta el ápice de la punta situada en la parte inferior derecha se descubre que esta linde está formada por una sola curva, que es la tercera etapa de la construcción de una nueva curva de Peano. ¡En el límite, esta preciosa curva llenaría completamente la región delimitada por la tradicional curva en "copo de nieve"! Así pues, la curva de Mandelbrot enlaza dos fractales que han sido hitos en la teoría: las dos más antiguas de todas ellas, la curva de Giuseppe Peano de 1890 y la curva en copo de nieve de Koch, algo posterior.

El secreto de la construcción de la curva de Mandelbrot consiste en utilizar segmentos rectilíneos de dos longitudes distintas, orientados en 12 direcciones diferentes. La curva resultante es mucho menos regular que las curvas de Peano precedentes, y, por tanto, mucho más próxima a los modelos ofrecidos por los fenómenos naturales, que son tema central del libro de Mandelbrot. En su configuración pueden verse formas tan naturales como las ramas, retorcidas y nudosas, de un árbol o el perfil flameante de una llama.

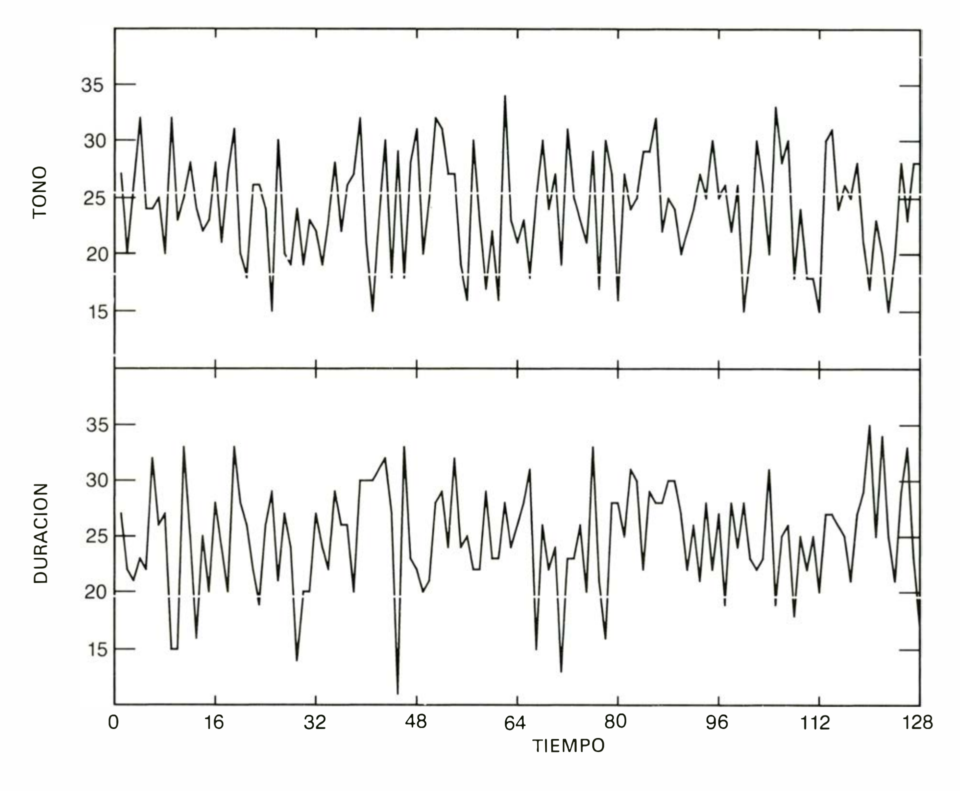
En la parte izquierda de la ilustración superior de la página 105 está la primera etapa de la construcción. Se traza una línea quebrada de nueve segmentos que entra y sale de un triángulo equilátero. A continuación, se dividen cuatro segmentos en dos partes iguales, creándose una línea que va desde *A* hasta *B*, formada por 13 segmentos largos y cortos. En la segunda etapa, cada uno de estos 13 segmentos se reemplaza por una copia a menor escala de la línea quebrada. Estas copias (que forzosamente son de distinto tamaño) se orientan según se muestra dentro de la estrella de la parte derecha de la ilustración. Una tercera repetición del procedimiento engendra la curva de la portada. (Dicha curva pertenece a una familia nacida del descubrimiento de la "curva serpenteante" por William Gosper, curva fractal que puede verse en la sección de Juegos matemáticos ya citada y en el libro de Mandelbrot.) Cuando se prosigue indefinidamente la construcción, resulta una sucesión de curvas cuya curva límite es una curva de Peano que llena completamente una región limitada por el copo de Koch. Como es habitual, la curva de Peano tiene dimensión 2, pero su frontera, una fractal invariante por cambios de escala de longitud infinita, tiene dimensión fractal de log 4/log 3, o sea, 1,2618..., como demuestra Mandelbrot en su libro.

| | AZUL | VERDE | ROJO |
|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 0 | 1 |
| 2 | 0 | 1 | 0 |
| 3 | 0 | 1 | 1 |
| 4 | 1 | 0 | 0 |
| 5 | 1 | 0 | 1 |
| 6 | 1 | 1 | 0 |
| 7 | 1 | 1 | 1 |

*Tabla binaria para el algoritmo $1/f$ de lanzamiento de dados, debido a Voss*

A diferencia de estas impresionantes curvas artificiales, las fractales que presenta la naturaleza –líneas de costa, ríos, árboles, cúmulos estelares, nubes, etcétera– son tan irregulares que su autosemejanza (invariancia por cambios de escala) tiene que analizarse estadísticamente. Consideremos el perfil de macizo montañoso de la ilustración inferior de la página 105, reproducido del libro de Mandelbrot. No es ninguna fotografía. Se trata de una cordillera generada por ordenador basándose en un ruido browniano modificado. Cualquier corte vertical transversal da un perfil topográfico que sigue el modelo del paseo aleatorio. Las manchas blancas, que representan agua o nieve retenida en los huecos situados por debajo de una cierta altitud, se han añadido para recrear la sensación de relieve.

El perfil de las cimas de la cordillera es una fractal autosemejante, lo que significa que si se ampliase cualquier pequeña porción de curva, la ampliación tendría estadísticamente el mismo ca-






*Música blanca*

rácter y las mismas propiedades que la curva que ahora se ve. Si fuese una auténtica curva fractal esta propiedad se conservaría por siempre, al ir ampliando porciones más y más pequeñas; pero evidentemente, una curva tal nunca podrá ser dibujada ni tampoco aparecerá jamás en la naturaleza. Una línea de costa, por ejemplo, puede mostrar aspecto invariable por cambios de escala al mirarla desde una altura de varios kilómetros hasta una altura de varios metros, mas a partir de ahí la propiedad fractal se pierde. Incluso el movimiento browniano de una partícula tiene como límite inferior el tamaño de sus microscópicos pasos.

Como las cordilleras se ajustan aproximadamente al mismo modelo que los paseos aleatorios, se puede crear "música montaraz" fotografiando una cordillera y traduciendo la fluctuación de sus alturas a tonos sonoros, oscilantes en el tiempo. Si se mira estáticamente a la naturaleza, imaginándola congelada en el tiempo, podremos hallar miles de curvas naturales que pueden usarse como se ha explicado para producir música estocástica. Esta música suele ser, por lo general, demasiado "parda", con demasiada correlación para resultar interesante. Lo mismo que el ruido blanco natural, el ruido pardo natural puede resultar bastante bien para temas de arte abstracto, pero no es lo suficientemente interesante para utilizarlo en temas musicales.

Cuando se analiza el mundo dinámicamente, formado por magnitudes que varían con el tiempo, tropezamos con un emporio de fluctuaciones de tipo fractal con densidades espectrales de la categoría $1/f$. Mandelbrot cita unas cuantas en su libro: las variaciones de las manchas solares, el cabeceo del eje de rotación terrestre, las corrientes submarinas, las corrientes de membrana del sistema nervioso de los animales, el fluctuante nivel de los ríos, y otras semejantes. Las incertidumbres en el tiempo medido por un reloj atómico son del tipo $1/f$: el error es de $10^{-12}$ independientemente de que se mida el error durante un segundo, un minuto o una hora. Los científicos tienden a dejar de lado los ruidos $1/f$ porque no hay buenas teorías para tomarlos en consideración, pero a duras penas podrán encontrarse facetas de la naturaleza que no los presenten.

T. Musha, físico del Instituto de Tecnología de Tokyo, descubrió recientemente que el tráfico que atravesaba cierto punto de una autopista japonesa presentaba una fluctuación de tipo $1/f$. En un experimento todavía más sorprendente, Musha hizo girar un rayo de radar emitido desde una estación costera con el fin de obtener una panorámica lo más variada posible de la costa circundante. Cuando hizo girar el haz de radar por primera vez, las distancias variables a todos los objetos explorados por el haz produjeron en la pantalla un espectro browniano. Pero el hacerlo girar por segunda vez y restar una curva de la otra, la curva resultante –que representa la totalidad de cambios en la panorámica– seguía de cerca la densidad espectral $1/f$.

Estamos ahora en vías de comprender la osada conjetura de Voss. El variable panorama del mundo (o dicho de otra forma, el cambiante contenido de nuestra experiencia) parece apiñarse alrededor del ruido $1/f$. No está, desde luego, totalmente incorrelacionado, como ocurre con el ruido blanco, ni tampoco tan fuertemente correlacionado como el ruido pardo. De la cuna a la tumba nuestro cerebro va procesando los fluctuantes

datos que hasta él llegan procedentes de sus sensores. Si se mide este ruido en la periferia del sistema nervioso (bajo la piel de los dedos, por ejemplo), según Mandelbrot tiene la estructura del ruido blando. Sin embargo, cuanto más nos acercamos al cerebro, tanto más se aproximan a l/*f* las fluctuaciones eléctricas. El sistema nervioso parece actuar como un complejo dispositivo de filtrado, que bloqueando los componentes irrelevantes de la información recibida del exterior procesa sólo los esquemas de cambio útiles para el comportamiento inteligente.

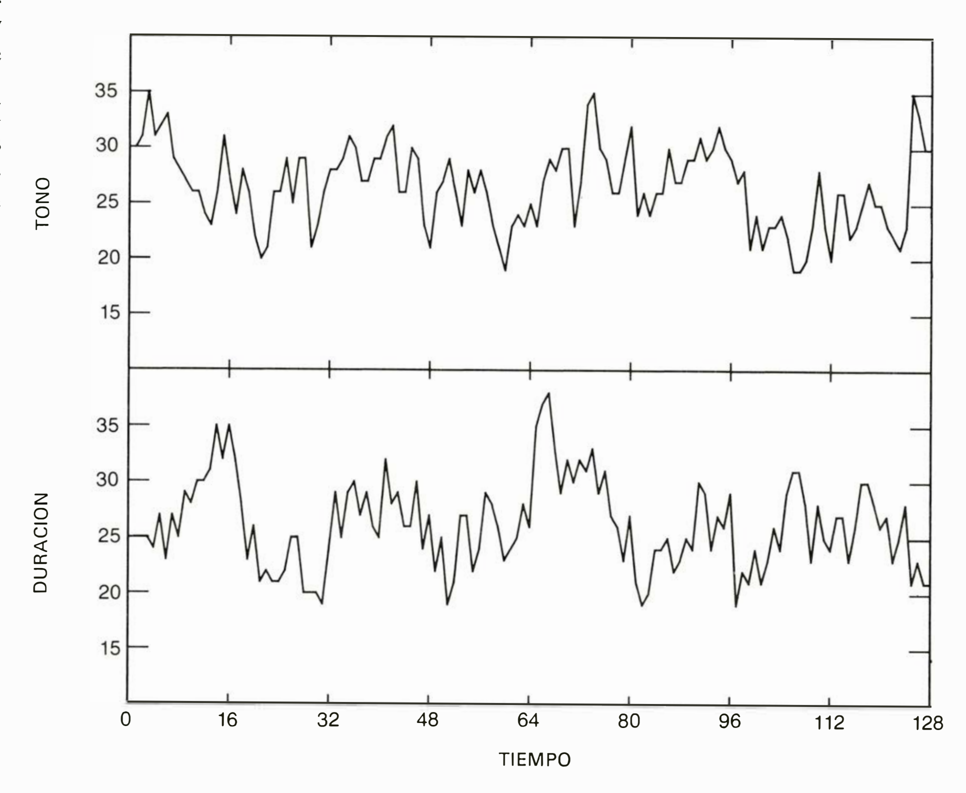
La pintura crea en el lienzo formas y colores estáticos; la pintura únicamente puede reflejar esquemas estáticos del mundo. "¿Es posible, se preguntó a sí mismo Mandelbrot hace ya muchos años, que incluso el arte más radicalmente no objetivo, cuando es agradable de observar, esté reflejando los esquemas fractales de la naturaleza?" Mandelbrot tiene algunas especulaciones no publicadas que discurren según estas directrices. Muy aficionado al arte abstracto, mantiene que hay una distinción tajante entre la pintura de este tipo de base fractal y la carente de ella; por lo general, se considera más bello al primero de estos tipos. Quizá por este motivo los fotógrafos de más agudo sentido estético no tienen dificultad en tomar fotos, muy especialmente microfotogramas, de configuraciones naturales que resultan casi indistinguibles del arte expresionista abstracto.

Evidentemente, al arte visual puede añadírsele movimiento, ya sea por cinematografía, en el escenario teatral, en la danza o en el arte cinético; pero en la música se tienen tonos carentes de significado propio, que nada representan, y que fluctúan creando motivos y temas que solamente pueden apreciarse durante cierto intervalo de tiempo. ¿Podrá ocurrir, se preguntó Voss, que el goce musical esté parcialmente relacionado con una distribución sonora en escala, de densidad espectral 1/*f*? Es decir, ¿"imita" esta música la cualidad 1/*f* de nuestra titubeante experiencia?

Esta conjetura podrá ser cierta o no, pero no cabe duda de que la música de casi todas clases muestra fluctuaciones del tipo l/*f* en sus cambios tonales, en la intensidad de sus notas. Voss demostró que tal observación es válida para la música clásica, el rock y el jazz, y tiene la sospecha de que también valga para los restantes tipos de música. No quedó sorprendido, pues, cuando utilizando el ruido de trémolo creado por un transistor para generar una tonada aleatoria, ésta resultó de audición más agradable que otras tonadas basadas en fuentes de ruido blanco o pardo.

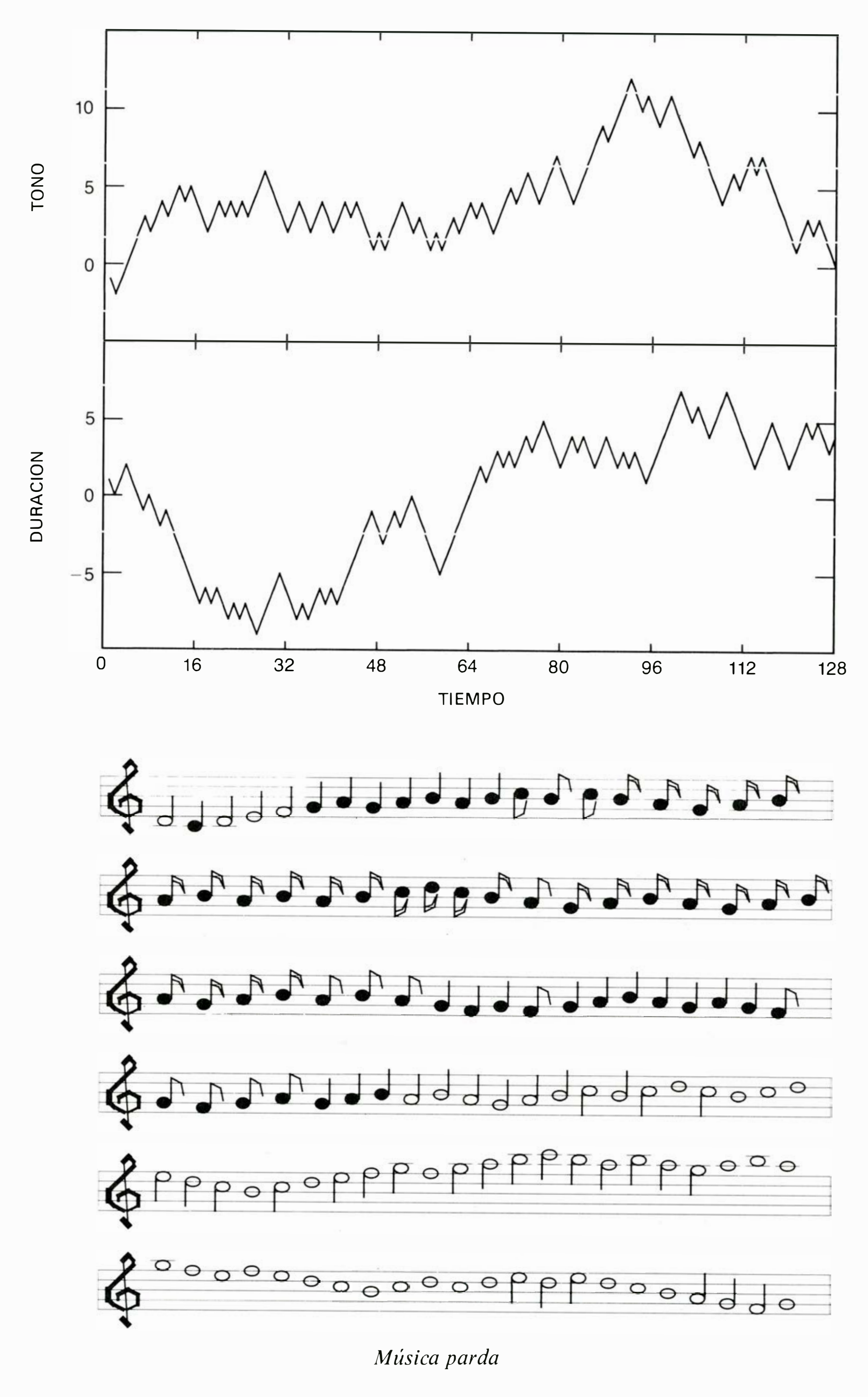
La ilustración de la página 106, proporcionada por Voss, muestra configuraciones típicas de ruido blanco, de ruido l/*f* y de ruido pardo, representándose en ordenadas los valores del ruido y en abscisas los tiempos. Tales configuraciones se obtuvieron mediante un programa de ordenador que simula la generación mediante dados de las tres clases de sucesiones. El ruido blanco se basa en las sumas de puntuaciones obtenidas lanzando reiteradamente 10 dados. Las sumas oscilan entre 10 y 60, pero por la ley de probabilidad los valores obtenidos se agrupan en torno a la mediana. El ruido browniano se genera lanzando un único dado y subiendo un tono si sale puntuación par o bajándolo si resulta puntuación impar.

El ruido l/*f* se generó también imitando el lanzamiento de 10 dados. Aunque el ruido l/*f* es extraordinariamente fre-






*Música 1/***f**




*Música parda*

cuente en la naturaleza, hasta hace unos meses se suponía que su generación mediante dispositivos aleatorios y ordenadores habría de ser sumamente tediosa. Los compositores de música aleatoria de años atrás ni siquiera conocían, probablemente, la existencia del ruido $1/f$, pero incluso de ser así hubieran encontrado considerables dificultades para generarlo. Cuando este artículo estaba en preparación se le preguntó a Voss si podría imaginar algún procedimiento sencillo mediante el cual pudieran los lectores componer sus propias tonadas $1/f$. Voss le dedicó alguna atención al problema, y con gran sorpresa suya acertó en un perspicaz procedimiento de simplificación de los algoritmos de ordenador dedicados a la obtención de ruido $1/f$, consiguiendo un sencillo procedimiento que funciona de maravilla.

Resulta más sencillo exponer el método considerando una sucesión de ocho notas elegida en una escala de 16 notas. Se usan tres dados de tres colores distintos: rojo, verde y azul. Sus posibles sumas van desde 3 hasta 18. Se seleccionan 16 notas consecutivas del piano, y se las numera de 3 a 18.

Se expresan los primeros ocho números, de 0 a 7, en el sistema de numeración binario, y se asigna a cada columna un color de dado, como se muestra en la figura de la página 107. La primera nota de nuestra tonada se obtiene lanzando los tres dados a la vez, y tomando la nota expresada por la suma de puntos. Obsérvese que al pasar de 000 a 001 solamente cambia el dígito rojo. Sin tocar los dados verde y azul, que siguen mostrando las puntuaciónes del lanzamiento anterior, se toma el dado rojo y vuelve a lanzarse. La nueva suma de las puntuaciones de los tres dados dará la segunda nota de la tonada. En la próxima transición, de 001 a 010, cambian los dígitos rojo y verde. Se recogen los dados verde y rojo, dejando intacto el azul, y se lanza de nuevo este par. La suma de los tres dados da la tercera nota. Para hallar la cuarta nota basta lanzar el dado rojo; para la quinta se lanzan los tres. El procedimiento consiste, brevemente, en lanzar solamente los dados correspondientes a cambios de dígitos.

No es difícil comprender por qué este algoritmo produce una sucesión equidistante del ruido blanco y del pardo. Los dígitos menos significativos, situados más a la derecha, cambian con frecuencia. Los dígitos más significativos, a la izquierda, son más estables. Por consiguiente, los dados correspondientes a ellos hacen una aportación constante a la suma durante largos intervalos de tiempo. La sucesión resultante no es del tipo $1/f$ con exactitud absoluta, pero se encuentra tan próxima a ella que es imposible distinguir las melodías compuestas de este modo de las generadas por ruido $1/f$ natural. Se pueden usar cuatro dados de forma análoga a la anterior para obtener una sucesión de 16 notas elegidas en una escala de 21 tonos. Con 10 dados se puede generar una melodía de $2^{10} = 1024$ notas dentro de una escala de 51 tonos. Desde luego, no hay inconveniente en poner en práctica algoritmos análogos que utilicen dados generalizados (octaedros, dodecaedros, etcétera), ruedas de la suerte, e incluso lanzando monedas.

Con el mismo programa de simulación de lanzamiento de dados, Voss ha creado tres melodías típicas basadas en ruido blanco, ruido $1/f$ y ruido pardo. Las salidas de la impresora del ordenador para estas tres melodías se dan en las ilustraciones de la página siguiente y esta misma página. En cada caso, Voss modificó tanto la melodía como la du-

ración de los tonos con la misma clase de ruido considerado. Se muestran sobre cada tonada los motivos sonoros utilizados.

Durante un período de dos años se tocaron baladas de los tres tipos en diversas universidades y laboratorios de investigación, escuchadas por muchos cientos de personas. La mayoría de los oyentes encontraron que la música blanca era demasiado caprichosa, excesivamente correlacionada la música parda, y que la música $1/f$ era "casi la buena". En realidad, basta una ojeada a la propia música para comprender que la música $1/f$ ocupa lugar intermedio entre ambos extremos. Las composiciones $1/f$ anteriormente escritas por Voss estuvieron basadas en ruido $1/f$ natural, por lo general de origen electrónico; aunque una de sus mejores grabaciones se deriva de




*Canon polindrómico e invertible de Mozart*

la estadística de los niveles de inundación anual del Nilo. No ha hecho ningún intento de imponer ritmos constantes. Cuando aplicó ruido $1/f$ a una escala pentatónica (de cinco notas) variando también el ritmo con ruido $1/f$, la música resultante recordaba fuertemente la música oriental. Tampoco ha ensayado posibles mejoras de su música $1/f$ introduciendo reglas de transición o de rechazo. Está convencido de que la música aleatoria que utiliza tales reglas mejorará mucho si la idea que las inspira se basa en ruido $1/f$ en lugar del ruido blanco hasta ahora utilizado.

Obsérvese que la música $1/f$ ocupa lugar intermedio entre la música blanca y la parda en sentido fractal, y no al modo de la música que impone al ruido blanco reglas de transición. Como ya hemos visto, este último tipo de música revierte en música blanca al comparar fragmentos suficientemente distanciados. Pero la música $1/f$ tiene la misma propiedad de permanecer en cada una de sus partes semejante al todo que tiene una línea de costa o el perfil de una cordillera. Analizando las fluctuaciones locales, a pequeña escala, incluso nota por nota, resulta ser de tipo $1/f$. Lo mismo ocurre descomponiendo una larga melodía en secciones de 10 notas y comparando las secciones entre sí. La melodía nunca olvida dónde ha estado. Siempre hay alguna correlación con la totalidad de su pasado.

Ya es tópico en crítica musical afirmar que el goce producido por la buena música se debe a que ofrece una mezcla de orden y de sorpresa. ¿Cómo podría ser de otro modo? La sorpresa no sería tal si no existiera suficiente orden para que podamos anticipar lo que tendría que venir después. Si nuestras expectativas se cumplen con demasiada exactitud, como ocurre al escuchar una tonada que no es más que subir y bajar por el teclado a intervalo de una nota, difícilmente puede haber ningún tipo de sorpresa. La buena música, como la vida de las personas o el grandioso panorama de la historia, es una mezcla prodigiosa de expectativas cumplidas e insospechados giros. Nada nuevo hay en estas ideas; pero lo que Voss ha conseguido es sugerir una medida matemática de la mezcla.

No puedo resistir la tentación de mencionar tres curiosas formas de transformar una melodía en otra diferente que tenga la misma densidad espectral $1/f$, tanto en sus motivos tonales como en las duraciones de las notas. Una de ellas consiste en escribir la melodía de atrás hacia delante; otra, en volver la partitura del revés, con lo que las notas pasarán a ser bajas, y recíprocamente. Finalmente, la tercera consiste en efectuar las dos operaciones anteriores. Estas transformaciones se realizan fácilmente en una pianola, sin más que pasar de atrás hacia delante y/o invertir el rollo de papel. Si se hace lo mismo con un disco o grabación magnetofónica resultan efectos desagradables, pues las notas no terminan ahora limpiamente, sino que van desvaneciéndose. (La música de piano recuerda a la de órgano.) Naturalmente, ambas clases de inversión destruyen los esquemas de transición introducidos por el compositor, y probablemente sea ésta la razón de que la música suene tan mal al reproducirla de este modo. Sin embargo, como Voss compuso sus melodías sin introducir reglas de transición de pasaje corto, sus melodías suenan por igual al tocarlas de cualesquiera de estas maneras.

Se escribieron, especialmente en el siglo XV, piezas contrapuntísticas para dos voces en la que una de las melodías es la otra de atrás hacia delante; con frecuencia, los compositores han buscado efectos contrapuntísticos invirtiendo el orden de secuencias cortas de notas en obras de duración grande. La figura de la página anterior muestra un famoso canon que Mozart escribió humorísticamente. En este ejemplo, la segunda melodía es la que ve, pasada del revés y de atrás hacia delante. Así pues, si se pone la partitura sobre una mesa, situándose un cantante a un lado y el otro enfrente, los intérpretes pueden leer la misma partitura y cantar concertadamente.

No se pretende decir que la música estocástica de tipo $1/f$, con reglas de transición o sin ellas, pueda competir con la música de los buenos compositores, desde luego. Sabemos que ciertas relaciones de frecuencias, como la razón de tres a dos de una quinta dominante, son más agradables que otras, tanto si ambos tonos se tocan simultáneamente como si se tocan en sucesión. Pero saber exactamente qué hacen los compositores cuando tejen y combinan sus hermosos acordes de sonidos sin significado continúa siendo un misterio que ni siquiera ellos comprenden.

En este punto parecen no estar de acuerdo Platón y Aristóteles. Platón miraba con reservas todas las bellas artes. Decía (o al menos, su Sócrates decía) que son imitaciones de imitaciones. Cada vez que algo se copia, algo se pierde. Un dibujo de una cama no es tan bueno como una cama real, y una cama real no es tan buena como la idea, universal y perfecta, de "ser cama". Platón estaba mucho menos interesado en los

puros goces del arte que en sus efectos sobre el carácter; por esta razón, su *República* y sus *Leyes* recomiendan la fuerte censura estatal de todas las bellas artes.

Por otra parte, Aristóteles reconocía que las bellas artes son valiosas para los estados, ante todo porque causan placer, y que este placer emana de que en realidad los artistas hacen mucho más que malas copias.

Dijeron, "Tienes una guitarra triste,
no tocas las cosas como son".
El hombre replicó: "Las cosas como son
se transforman por la guitarra triste".

Wallace Stevens pretendía que su guitarra triste representara a todas las artes, pero la música, mucho más que cualquier otro arte, e independientemente de los matices imitativos que pueda poseer, implica la creación de algo radicalmente nuevo. En alguna ocasión se podrán encontrar escenas naturales que recuerden una determinada pintura, o vivir episodios que le hagan pensar en una novela o una obra teatral. Pero nunca se encontrará en la naturaleza nada que suene como una sinfonía. Con respecto a si algún día llegarán los matemáticos a escribir programas de ordenador que creen buena música –cuando menos una tonada sencilla y pegadiza– sólo el tiempo podrá decirlo.

Los problemas lógicos del mes pasado, extraídos de *What Is the Name of This Book?* escrito por Raymond M. Smullyan, tienen las siguientes soluciones:

1. El León del Bosque del Olvido solamente puede decir "ayer mentí" en dos días: lunes y jueves. El Unicornio solamente puede hacer el mismo aserto los jueves y domingos. Así pues, el único día en que el León y el Unicornio pueden ambos decir lo mismo es el jueves.

2. Las inscripciones de los cofrecillos de oro y de plomo dicen una lo opuesto de la otra, y por consiguiente al menos una ha de ser cierta. Como a lo sumo puede haber un enunciado verdadero, el enunciado del cofrecillo de plata es falso. Por consiguiente, el retrato se encuentra en el cofrecillo de plata.

3. Si *B* es inocente, entonces se sabe (por el hecho establecido número 1) que *A* o *C* son culpables. Si *B* es culpable, necesariamente ha de tener un cómplice, pues no sabe conducir; así pues, de nuevo resulta que *A* o *C* han de ser culpables. Por consiguiente, *A* o *C*, o ambos, son culpables. Si *C* es inocente, *A* tiene que ser culpable. Si *C* es culpable, entonces, por el hecho 2, también *A* es culpable. Así pues, *A* es culpable.

4. Hay que decir "No soy un caballero pobre". La chica razonaría que si usted fuese un pícaro, desde luego no sería un caballero pobre; por consiguiente, su declaración sería verdadera. Como un pícaro nunca puede hacer una declaración verdadera, esta contradicción elimina la hipótesis. Así pues, usted ha de ser caballero. Como los caballeros siempre dicen la verdad, usted no es un caballero pobre, sino rico.

5. Un habitante de la Isla de los Zombis ha respondido "bal" a la pregunta: ¿Es cierto que "bal" significa "sí"? Si bal significa sí, entonces bal es una respuesta verdadera; por consiguiente, el que habla es humano. Si bal significa no, también la respuesta es verdadera; por consiguiente, el que habla es humano. No se puede determinar lo que significa "bal", pero la respuesta demuestra que el isleño en cuestión es humano.

6. Para determinar con una sola pregunta lo que significa "bal" se le pregunta al isleño si es humano. Como tanto los humanos como los zombis contestarían afirmativamente a esa pregunta, si responde "bal" esta palabra significa "sí". Si responde "da" entonces "da" significa "sí" y "bal" significa "no".

7. Para determinar con sólo una pregunta si un transilvanio es un vampiro, se le pregunta si está cuerdo. Un vampiro dirá que no y un humano dirá que sí. (Se deja la demostración al cuidado del lector.) Para saber si el transilvanio está cuerdo, pregúntesele si es un vampiro.

Los admiradores de M. C. Escher, así como todos los interesados en la hermosa simetría de los poliedros regulares, quedarán fascinados por *M. C. Escher Kaleidocycles,* colección de juguetes matemáticos publicada en noviembre pasado por Ballantine Books. La colección consta de 17 hojas (muchas de ellas en brillantes colores) de cartulina parcialmente cortada a matriz y un libro de instrucciones para montar la "escultura de Escher".

Los modelos van desde los sólidos platónicos, decorados con motivos creados por Escher hasta anillos de tetraedros que "flexionan" de extrañas formas. Fueron diseñados por Doris Schattschneider, matemática del Moravian College, y Wallace Walker, dibujante gráfico de Nueva York. La Sra. Schattschneider aporta al folleto un artículo de carácter informativo sobre la estructura matemática de los modelos, y reproduce algunos gráficos de Escher inéditos hasta ahora.

# Taller y laboratorio

## *El atractivo de la llama de una vela realzado por la física y la química que subyace a la misma*

Jearl Walker

Yo crecí a la luz de la vela, que nos daba la iluminación necesaria para combatir la obscuridad de la noche en las grandes tempestades de Texas. Recuerdo con frecuencia los momentos en que estaba tendido en la cama antes de dormirme, hipnotizado y maravillado ante la contemplación de la llama ardiendo. Había visto otras muchas cosas quemarse, pero siempre lo hacían mucho más rápidamente. La vela ardía tan lentamente que la mecha duraba toda la noche e, incluso, un par de ellas.

Había otros aspectos de las velas que me intrigaban casi tanto como lo anterior: ¿por qué una vela hecha de cera era mejor que otra fabricada con un material distinto? ¿Por qué la mayor parte de la llama era amarilla y sólo tenía una pequeña zona en su base de color azul? ¿Por qué se formaba en el interior de la llama una especie de cono obscuro entre la mecha y la zona amarilla de la misma? ¿Por qué algunas velas producían humo, otras ardían limpiamente y unas terceras parpadeaban a distinta velocidad? Finalmente, ¿por qué tizna de negro la llama de una vela mientras que, si se apaga, el humillo que desprende es blanco?

Todas estas son viejas preguntas que probablemente tengan viejas respuestas. Pero la realidad es que algunas de ellas se siguen contestando con algunas reservas. En este trabajo describiré cómo puede uno fabricarse su propia vela y cómo investigar sobre la física y la química de la llama de una candela. De aquí saldrán respuestas a algunas de las preguntas básicas. En parte seguiré las huellas de Michael Faraday, quien se sentía fascinado tanto por la sencillez como por la complejidad de las llamas de las velas.

Además de la parafina, que era la materia prima con la que mi abuela hacía las velas, se han empleado otros materiales, a saber: sebo, estearina, espermaceti (obtenido a partir del esperma de ballena o de cachalote) y cera de abejas. En la actualidad se puede comprar parafina en cualquier almacén de comestibles o en tiendas de pasatiempos. A veces viene mezclada con estearina (ácido esteárico) para elevar su punto de fusión, darle mayor resistencia a la vela y hacer que la misma se consuma más lentamente.

La mecha también se puede adquirir fácilmente. Suelen hacerse de hilo de algodón trenzado, el cual ha sido previamente curtido en una sustancia que evita que produzca humos. Este tratamiento es necesario, ya que el algodón natural ardería demasiado rápidamente y produciría mucho humo. El objetivo es hacer que la mecha arda de manera que produzca una llama alargada, para lo cual las sales inorgánicas contenidas en la celulosa de la mecha se combinan con los fosfatos y los boratos de las sales inhibidoras con lo que se obtendrá una descomposición sin cenizas.

Hacer una vela no es difícil; a mí me enseñó a hacerlas Liz Knepp, de Cleveland, pero se pueden encontrar procedimientos similares y con todos los detalles en los muchos libros que existen sobre dicha técnica. Empleé un recipiente de dos pisos, de manera que el agua hirviera en la parte inferior y la parafina se calentara en la superior. Debe controlarse la temperatura por medio de un termómetro casero. Si la parafina no se ha mezclado bien con la estearina con el fin de hacerla más resistente, se fundirá en un rango de temperaturas comprendido entre 48 y 74° Celsius. Si la estearina no ha sido suficientemente dosificada, debe añadirse una cantidad de ésta tal que sea igual al 5 por ciento del volumen total de la parafina. La estearina incrementa el punto de fusión y evitará que la vela arda demasiado de prisa. Las velas de las iglesias son, a menudo, de estearina solamente. En el recipiente no debe sobrecalentarse la parafina ni exponerla a la llama directamente. Si se incendiara, no debe apagarse con agua, ya que se endurecería formando terrones.

Mientras la cera se funde, hay que preparar el molde de la vela. Se pueden usar diversos tipos de moldes metálicos según la forma que se quiera dar a la vela, pero debe evitarse el uso de aquellos de los que sea luego difícil extraer la candela. En el fondo del molde se abrirá un agujero y por éste se introducirá una cantidad adecuada de mecha, la cual se sujetará practicando un nudo en el exterior. En el extremo abierto del molde se pondrá un lápiz en posición horizontal, al cual se atará la mecha de forma que quede tirante a lo largo de todo el molde. Para facilitar la extracción de la vela, deberá rociarse el interior del molde con silicona, utilizando un pulverizador.

La elección de la mecha es muy importante, ya que de ello dependerá el que la vela arda de forma adecuada. Si la mecha es demasiado ancha, producirá una llama humeante; si demasiado estrecha, producirá una llama vacilante que acabará apagándose. Una regla no muy precisa, pero muy útil, que puede seguirse es la que dice que la mecha debe elegirse de acuerdo con el diámetro de la vela.

Cuando la cera se haya fundido, viértase cuidadosamente en el molde.

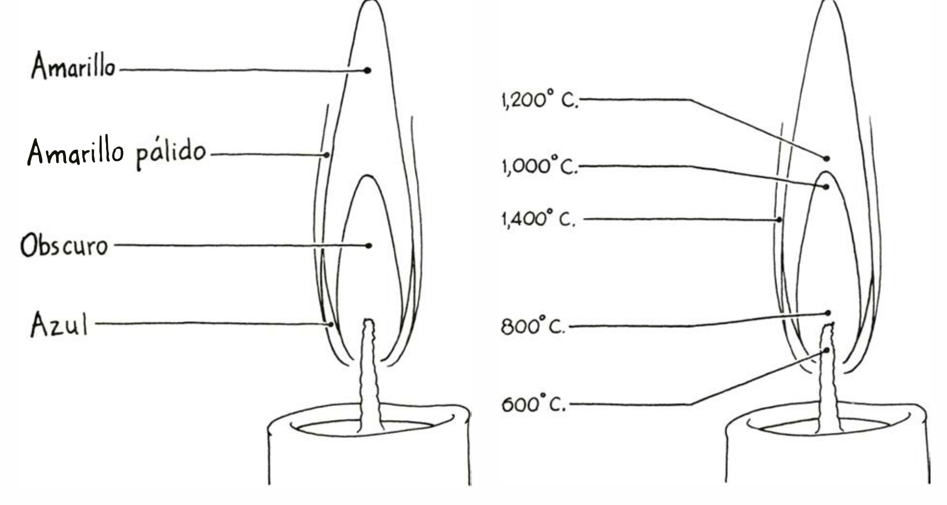


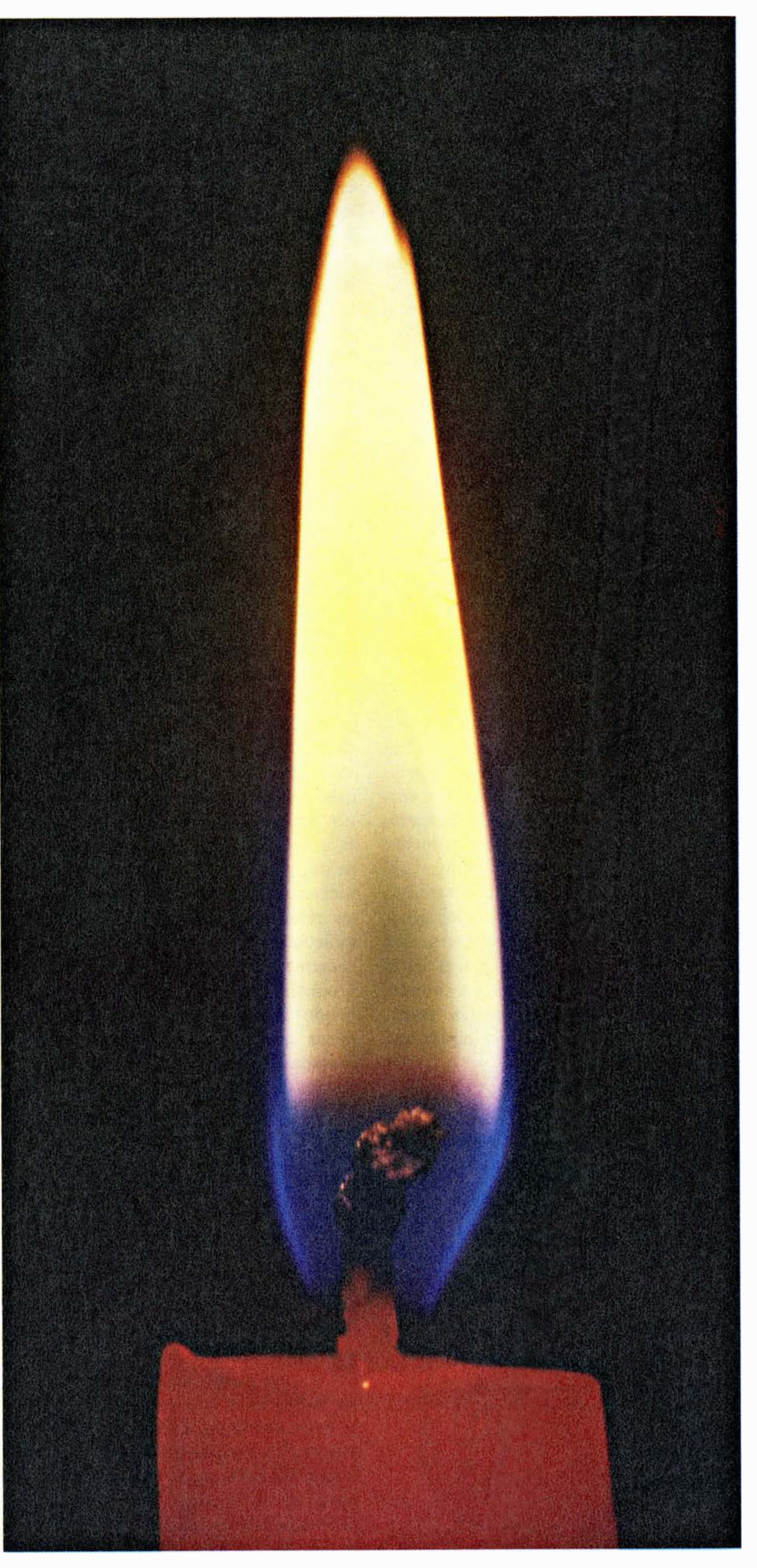

*Diagrama de colores y temperaturas típicas de una llama*

Déjela enfriar un rato e introduzca entonces, a todo lo largo del eje longitudinal de la vela y en la zona próxima a la mecha, un destornillador fino o cualquier otro utensilio de forma similar, con lo que eliminará las burbujas de aire y conseguirá que la contracción que sufrirá la cera al enfriarse sea homogénea. Una vez retirado el destornillador, hay que rellenar el hueco dejado por éste con cera fundida. La acción anterior debe repetirse varias veces con el fin de conseguir una contracción suficiente. Al día siguiente ya se puede abrir el molde y, tras quitar los nudos de la mecha, se saca la vela. Tenemos, pues, la vela con la cual comenzar los experimentos.

Faraday, cuyo nombre se asocia normalmente con sus amplios trabajos de investigación sobre la electricidad y el magnetismo, hizo también sus escarceos sobre la física y la química de las velas. En 1860 y 1861, como parte de las celebraciones de Navidad en la Royal Institution y para su "juvenil auditorio", Faraday dio seis lecciones encaminadas a mostrar el vasto alcance científico que oculta una simple vela. Tratando de comprender por qué una vela arde, he repetido varios de los experimentos de Faraday, así como algunos otros y también he investigado las teorías establecidas a proposito de la llama. Quitando las modernas teorías sobre las moléculas y las emisiones atómicas, las indagaciones sobre las llamas de las velas han progresado sorprendentemente poco desde los tiempos de Faraday.

Cuando se enciende una vela, se ve rápidamente cómo el calor radiado por la llama funde la cera próxima a la mecha; esta cera líquida sube por la mecha en virtud de la atracción capilar, lo cual es como decir que las fuerzas atractivas entre las moléculas de cera y las moléculas de la mecha hacen subir la cera. Una vez que llega a la punta de la mecha se vaporiza. Las moléculas de hidrocarburo liberadas llevan a cabo diversas funciones en la llama.

La llama tiene características muy interesantes, que no son otras que las que yo descubrí de niño. Inmediatamente encima de la mecha puede observarse un cono obscuro que está rodeado por la zona amarilla, que es, en realidad, la principal causa de la luminosidad. En los lados de la llama y cerca de la mecha hay unas zonas azules. Dependiendo del diámetro de la mecha y de la altura de la llama, las zonas azules pueden llegar hasta una determinada altura de la llama o pueden incluso alcanzar la parte alta de la zona amarilla. Es sorprendente el hecho

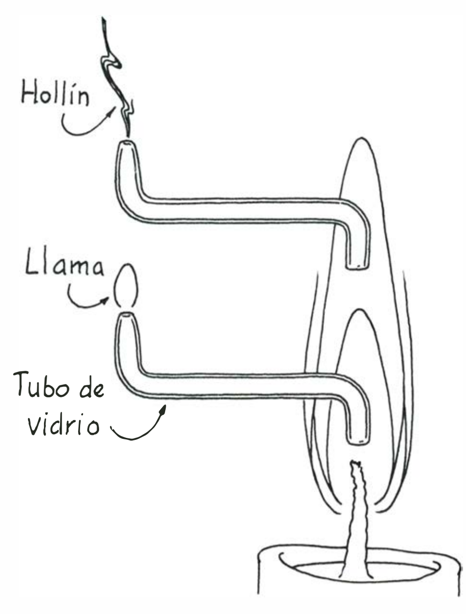


*Llama de una vela*

de que las moléculas combustibles, al vaporizarse, den lugar a tres zonas distintas en lugar de una sola zona de color uniforme.

En la moderna clasificación de las llamas, el tipo de las producidas por las velas se denomina "llamas de difusión". Otro tipo familiar son las llamadas "premezcladas", cuyos ejemplos más típicos son los mecheros Bunsen y la llama de las estufas de gas. En una llama de difusión, la relación de combustión viene determinada por la velocidad a la que un gas se mezcla con el otro y viceversa; en una llama premezclada, sin embargo, los gases se mezclan antes de quemarse y, por tanto, la relación de combustión depende de la relación de los caudales o flujos de los gases. Por ejemplo, el gas de las estufas se mezcla con el aire antes de que lleguen a las boquillas de los quemadores. Otras clasificaciones de llamas contemplan la posibilidad de que tengan turbulencia, pero nosotros aquí nos limitaremos a la llama de difusión no turbulente.

Tal vez sorprenda el hecho de que la zona de la llama cuya temperatura es más alta no se encuentre cerca de la mecha. El extremo superior de la mecha es, en relación con el resto, una zona fría, pues su temperatura alcanza solamente unos 600 grados Celsius. Conforme se va subiendo en altura, la temperatura va progresivamente en aumento hasta alcanzar aproximadamente 1200 grados Celsius, en la parte central de la zona amarilla. Un poco más altas, alrededor de 1400 grados Celsius, se dan fuera del centro y por los bordes de la llama amarilla. Esta falta de uniformidad en la distribución de las temperaturas a lo largo de la llama impide una explicación cabal de todo lo concerniente a la emisión luminosa de la llama.



*Experimentos con un tubo de vidrio*

El cono obscuro constituye una región relativamente fría justo encima de la mecha. Allí, las moléculas combustibles liberadas están insuficientemente calientes y tienen tan poco oxígeno que emiten poca o ninguna luz. Se desconoce en qué estado se encuentran las moléculas liberadas en esta zona, cómo se descomponen en átomos simples o en moléculas diatómicas y dónde se combinan para reaccionar entre sí produciendo partículas sólidas de carbón. Uno de los rasgos más curiosos de las llamas es que, aunque el combustiblevaporizado se encuentre encima mismo de la mecha, en ningún otro punto de la llama se vaporiza combustible aún cuando se ponga en contacto con una cantidad significativa de oxígeno. Contrariamente a la imagen intuitiva que yo tenía de la llama, ni el calor ni la luz de la misma provienen de la simple oxidación del combustible evaporado en la mecha.

Las regiones azules de la llama definen la zona de reacción. En dicha zona, las moléculas grandes de hidrocarburos vaporizados en la mecha se descomponen en moléculas más pequeñas, las cuales reaccionan entre sí y con el oxígeno que se ha difundido por la llama y que proviene del aire que la rodea. La luz azulada se debe principalmente a la emisión de dos moléculas, la molécula de carbón ($C_2$) y la molécula de un hidrocarburo (CH) que se producen en las referidas reacciones químicas. Estas moléculas en lugar de activarse térmicamente por el calor del entorno, pueden producirse ya con su estado de excitación a partir de las reacciones químicas que las cree. Por lo que la luz azulada quizá no sea una emisión que resulte directamente del calor.

Mientras que los átomos simples emiten luz en una determinada longitud de onda, las moléculas la emiten en lo que se llama bandas de emisión, que están formadas por grupos separados constituidos por conjuntos de longitudes de ondas muy próximas. A menos que se examine la luz por un espectroscopio de gran dispersión, la banda de emisión emitida por una molécula parecerá que se extiende uniformemente sobre un amplio rango de longitudes de onda, sobre todo si se compara con lo que se vería con la luz emitida por un simple átomo. La emisión más fuerte de la molécula CH tiene lugar en una banda alrededor de la longitud de onda del azul (432 nanómetros), junto con otras emisiones que se encuentran en bandas de más cortas longitudes de onda en la zona del azul obscuro. La molécula $C_2$ emite más intensamente en lo que se ha llamado banda de Swan, un compacto conjunto de bandas en el verde, con menos intensidad en dirección al azul y al azul intenso. En la llama de una vela el efecto concreto de la emisión de estas moléculas es una emisión azulada por lo menos en la parte baja de la zona de reacción.

Para mí la región más interesante de la llama de una vela es la amarilla, conocida por zona del carbono o zona luminosa. Allí las partículas sólidas de carbón son calentadas hasta la incandescencia por los gases y por el calor radiado de la zona de reacción.

Esta incandescencia produce la luz amarillenta. Se emite todo el espectro visible; lo que ocurre es que la emisión en la zona del amarillo es más intensa y su percepción prevalece sobre las demás. La emisión no es como las despedidas por una molécula o por un átomo simple, ya que ahora se emite todo el espectro en vez de colores individuales. Alguien ha podido ver algo similar si alguna vez ha calentado un atizador blanco ya caliente. El calor del atizador hará que las radiaciones térmicas se extiendan por todo el espectro visible, emitiendo todos los colores y, por tanto, dando una percepción neta de luz blanca.

Las partículas sólidas de carbón en la zona luminosa tienen un tamaño que va desde los 10 a los 200 nanómetros, siendo la mayoría de ellas no mayores de los 50 nanómetros. Si una vela humea, está lanzando partículas de carbón sólidas, la mayoría de las cuales serán mayores de 50 nanómetros. La primera persona que explicó la luz amarilla por medio de las partículas incandescentes de carbono sólido fue Humphry Davy, maestro de Faraday. Aunque Davy expuso su teoría hace más de un siglo, el mecanismo por el cual se generan dichas partículas queda por explicar.

Una hipótesis popular es que las grandes moléculas de hidrocarburo, cuando se desprenden, primero se rompen en moléculas de carbono atómico y de carbono diatómico y, luego, se agrupan de algún modo o bien algún agente exterior les hace tomar forma sólida. Según otra hipótesis, los hidrocarburos primero se agrupan para formar partículas sólidas y luego pierden su hidrógeno. En cualquier caso, parece ser una condición fundamental para la formación de dichas partículas que la deficiencia de oxígeno se dé en la zona obscura por encima de la mecha. Sea cual fuere el verdadero mecanismo, las partículas de carbón sólido se forman al tiempo que llegan a la zona luminosa, en donde se hacen incandescentes y donde

producen la delicada llama amarillenta de las velas.

Conforme las partículas van ascendiendo a través de la zona luminosa se van consumiendo por reaccionar con el agua y el dióxido de carbono (los principales productos de la llama) para producir monóxido de carbono. En una llama sin humo, las partículas se consumen totalmente conforme suben hasta la parte alta de la llama. De lo contrario se desprenderían como hollín. El ennegrecimiento por el hollín ocurre normalmente si la mecha es demasiado gruesa, puesto que arrastra una cantidad de combustible tal que no puede ser consumido por la llama.

Vayamos a los experimentos. Una de las demostraciones más simples de Faraday fue colocar la vela a pleno sol y examinar la sombra producida por la llama. La zona más obscura de la sombra procedía del área luminosa, que es la más brillante en la propia llama. La obscuridad de la sombra se produce porque la colección de partículas sólidas es más densa allí. Para actualizar de alguna manera a Faraday proyecté un destello con un láser de neón y helio de baja potencia (20 milivatios) sobre la llama, esperando ver luz láser dispersada por las partículas sólidas de carbón. Sin embargo, la dispersión no era suficientemente intensa como para poder apreciarse a simple vista.

Doblemos ahora sobre un quemador Bunsen de gas un tubo de cristal delgado y corto, como se muestra en la ilustración de la página 116. Hay que afilar un extremo y poner el otro en la parte más baja de la zona obscura de la llama de la vela. Los hidrocarburos vaporizados pasan por el tubo y salen por el extremo afilado en forma de corriente transparente, o blanca si el vapor se condensa de alguna manera y forma gotas pequeñas de cera. El vapor habría producido partículas de carbono si se le hubiera permitido subir a la zona iluminada, pero aún puede arder si se aplica una llama al extremo libre del tubo.

En lugar de quemar así el vapor, se puede recoger en un vaso frío o en una redoma. El vapor se condensará y formará una fina película de cera en las paredes interiores. Esta recuperación de la cera sólida implica que el vapor que entra en el tubo no ha tenido la oportunidad de completar el mecanismo que produce las partículas sólidas de carbón en la zona luminosa.

Si se levanta el extremo del tubo que está en contacto con la llama hasta la zona luminosa, saldrá hollín en lugar de vapor por el otro extremo. El tubo no recoge ya hidrocarburos vaporizados sino que está desviando algunas partículas sólidas de carbón procedentes de la zona luminosa. Las partículas de carbón salen del tubo en su forma natural –es decir– hollín, ya que no han tenido la oportunidad de ser consumidas por la reacción del agua y el dióxido de carbono.



*Procesos que tienen lugar en una llama*

Cualquier obstáculo, sobre todo si es frío, colocado en la zona luminosa puede provocar que se forme hollín porque el obstáculo interrumpe el consumo de las partículas sólidas de carbón. Se puede hacer la prueba con un clip de papel enderezado: éste se cubrirá inmediatamente de hollín. Si se coloca un trozo de tela metálica en la zona amarilla, ésta puede obstruir completamente la combustión de las partículas de carbón y evitar que la llama llegue más arriba de la tela metálica.

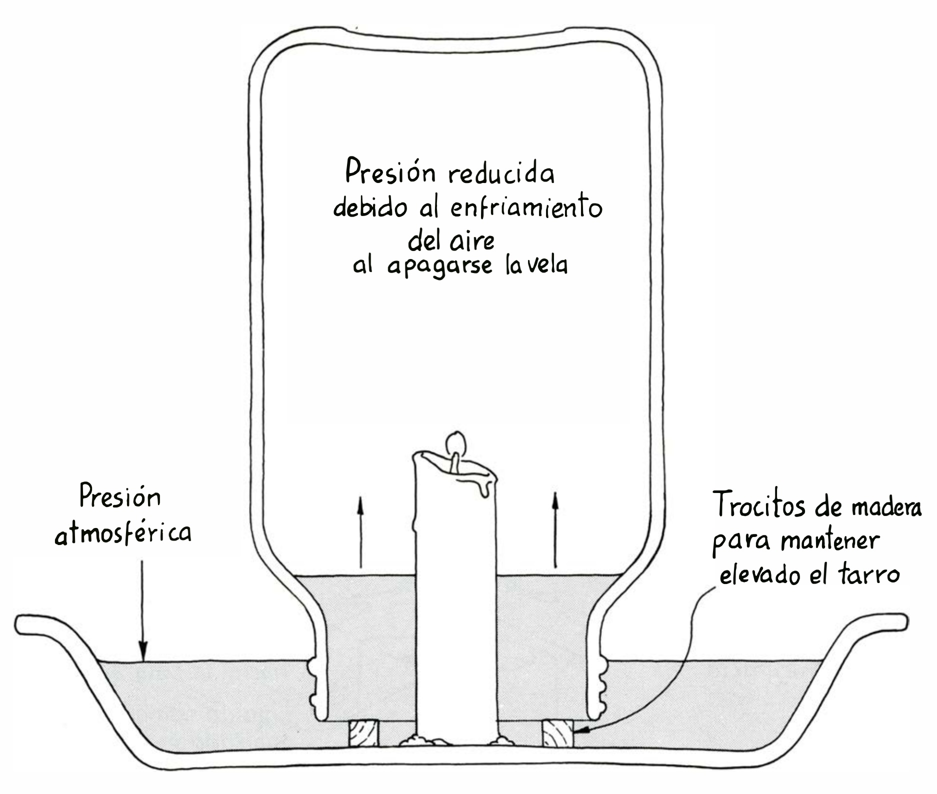
En otra demostración, Faraday se propuso descubrir la combustibilidad de los hidrocarburos vaporizados. Para ello hay que apagar de un soplo rápido la llama de la vela, sin variar la corriente de vapor blanco que sale después de apagarse. Coloquemos una cerilla encendida sobre la mecha en la corriente ascendente. Si esto se hace a tiempo, la llama arderá hacia abajo y volverá a encerder la vela. Cuando se apaga la vela de un soplo, parte de la cera continúa vaporizándose por los gases calientes y la mecha. Esta corriente ascendente de vapor es combustible.

Intenté encender el vapor después de haber vertido cera fundida dentro de un pequeño recipiente de pyrex, colocando a éste en un hornillo eléctrico hasta que podía apreciarse desprendimiento de vapor. La llama se encendió dentro del recipiente, pero desapareció pronto debido a la falta de oxígeno en los estrechos confines del recipiente. El vapor que sube de la mecha en la llama de una vela es combustible, pero no arde ni emite luz porque falta oxígeno en ese punto. Por eso, en la zona que está inmediatamente encima de la mecha la llama es obscura.

La llama solamente produce luz cuando se forman las partículas sólidas de carbón y se hacen incandescentes.

Se puede demostrar el rápido consumo de pequeñas partículas, tales como las de carbón en la zona luminosa, echando por medio de un pulverizador polvo combustible fino a la llama de la vela. Faraday usó polvo de licopodio. Pero se puede usar también harina tamizada.

Cuando se sopla ligeramente el polvo a través de la llama, arde en seguida con un chisporroteo apreciable. Si se lanzaran las partículas de harina sin tamizar la llama, no arderían con tanta facilidad y es posible que no ardieran en absoluto. Los granos más pequeños arden mejor porque tienen una mayor superficie al descubierto. Este efecto implica un grave peligro en las minas y plantas industriales que tienen una gran cantidad de finas partículas de polvo en el ambiente. En un ambiente de este tipo, una




*El experimento de la jarra invertida*

chispa fortuita puede causar una combustión extremadamente rápida que provocaría una violenta explosión.

La distribución de la temperatura en la llama de una vela puede ser demostrada de forma aproximada atravesando la llama con una hoja de papel y fijándose en las zonas ennegrecidas del mismo justo antes de que empiece a arder. Estas zonas negras aparecen más o menos formando un círculo alrededor del centro de la llama de la vela, lo cual indica que el centro de la llama está más frío que el borde exterior.

Traté de poner obstáculos al mecanismo de mi vela, protegiendo la punta de parafina con una lámina de aluminio para bloquear el calor emitido por la llama. Como era de esperar, la cera fluyó a lo largo de la mecha reducida y la llama palideció. Podía haber obtenido el mismo resultado si hubiera cubierto la parafina con un filtro de infrarrojos, es decir, un filtro que bloqueara la radiación infrarroja pero que dejara pasar la radiación visible, porque casi toda la radiación de la vela es de rayos infrarrojos. Menos del 0,4 por ciento del calor es radiado en forma de rayos ultravioleta o visibles.

El efecto de los campos eléctricos en las llamas de las velas ha sido descubierto hace mucho tiempo. Para comprobarlo coloqué mi vela entre los polos opuestos de la máquina de Wimshurst, el antiguo generador manual de electricidad estática de alto potencial. La llama era atraída hacia el polo negativo y repelida por el polo positivo.

Parece ser que cuando la llama está en el campo eléctrico que está situado entre los polos, los electrones libres de la llama son desviados hacia el polo positivo, pero debido a que el observador no puede ver la corriente de electrones, el efecto no es observable. Sin embargo, la llama queda cargada con gran abundancia de iones positivos, los cuales son relativamente pesados y menos móviles que los electrones. La llama cargada positivamente es repelida entonces por el polo positivo y atraída por el negativo.

El agua es uno de los productos que se libera en la quema del hidrógeno por el combustible vaporizado. Esta se puede recoger pasando una cuchara fría sobre la parte alta de la llama, teniendo cuidado de evitar que se acumule hollín. Para medir la cantidad de agua se puede poner un embudo sobre la llama y recogerla en un recipiente frío por medio de un tubo de goma. Quizás el observador quiera medir cuánta agua se produce por una cantidad determinada de consumo de la vela.

Una demostración común relacionada con la quema de una vela se ha interpretado a veces erróneamente. Coloquemos una vela en el fondo de un cazo fijándola con unas gotas de cera caliente. Después, se vierte agua dentro del cazo hasta una altura aproximada de un cuarto de la altura de la vela. Se enciende la vela y se pone una jarra transparente grande invertida sobre ésta. La boca de la jarra deberá estar sumergida en el agua, pero sin llegar al fondo del cazo (se puede colocar en esta posición con soportes de madera, por ejemplo) para permitir que el agua pase al interior de la jarra. El nivel del agua subirá de forma clamorosa hasta llegar quizás a cubrir la vela: ello se debe a que la llama de la vela consume el oxígeno existente dentro de la jarra invertida y ésta acaba por apagarse.

Este efecto se ha atribuido a veces, erróneamente, a la pérdida del oxígeno del aire cerrado a medida que se va quemando la vela. Pero esa no puede ser la razón, porque la quema en sí libera gases y vapores, sobre todo dióxido de carbono y agua. La subida del nivel del agua se debe en realidad al enfriamiento del aire contenido en el interior de la jarra, a medida que la llama de la vela se debilita y se apaga. Cuando se pone la jarra sobre la vela, el aire que queda en su interior está caliente y se dilata; parte del mismo puede incluso fugarse formando burbujas por debajo del borde sumergido de la jarra. A medida que la llama se debilita, el aire se va enfriando y se contrae, por lo que la presión atmosférica del exterior de la jarra empuja el agua hacia arriba dentro de la misma.

Se pueden demostrar los posibles tipos de llama de una vela, desde la que apenas se mantiene encendida porque recibe poco combustible hasta la llama que echa abundante humo porque tiene demasiado combustible. Esto se consigue poniendo en varias velas mechas de distintos tamaños en cada una. Para ahorrar tiempo, usé una vela llamada "contravela", la cual consiste en una mecha introducida en un soporte de plástico que flota en el combustible, que puede ser aceite vegetal. El soporte flotante posee dos compartimentos; la parte central, agujereada, permite el flujo del aceite por la mecha. La sección exterior no tiene agujeros, lo que evita que la plataforma se hunda. Cuando la mecha está encendida, el aceite sube por ella, se vaporiza y se quema produciendo llama.

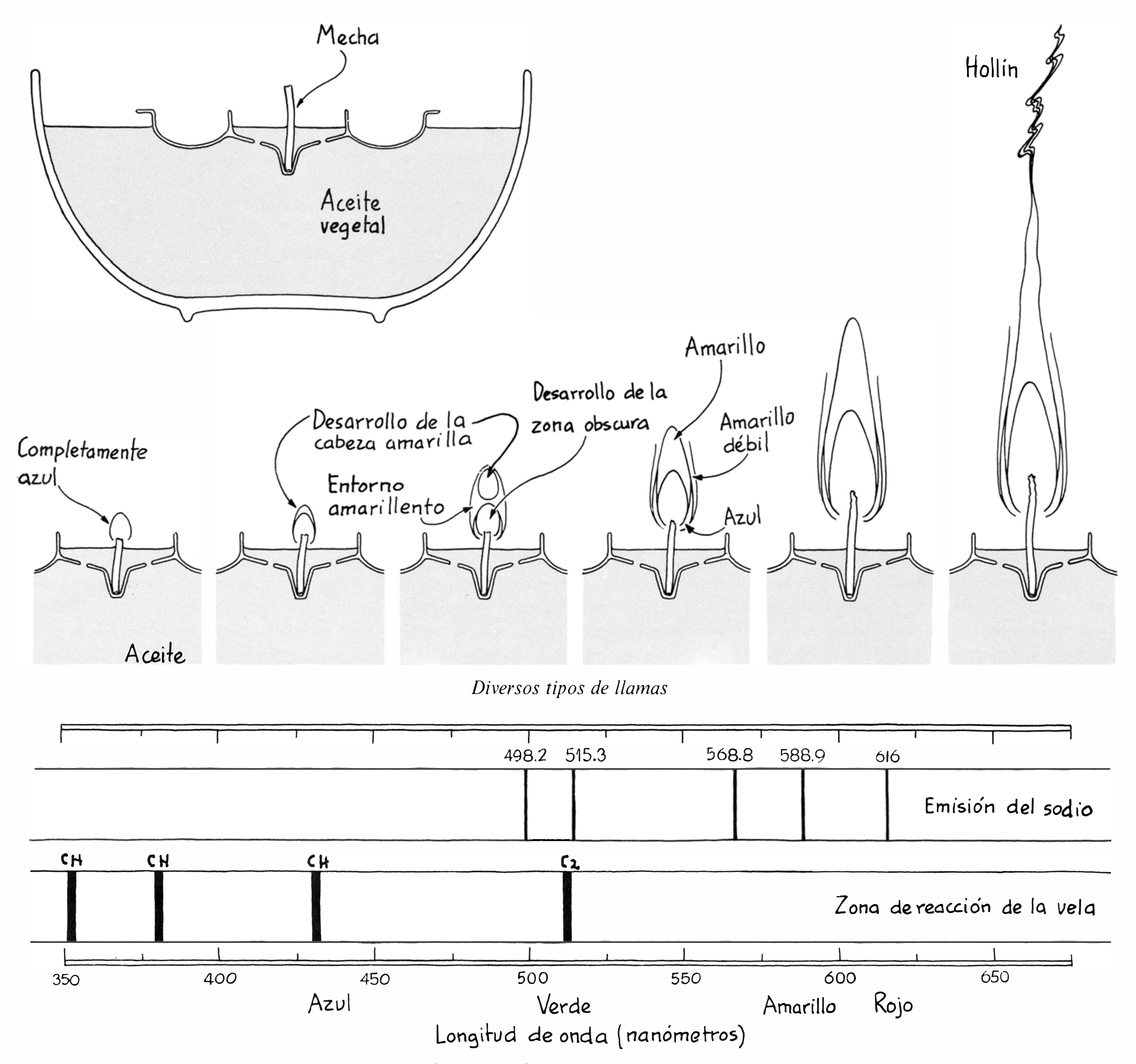
Si se empuja ligeramente la plataforma hacia abajo, la llama se debilita. Si se levanta, también ligeramente, la llama se aviva y lo hace con tanta intensidad que produce hollín. Con un tapón de plástico, puede construirse, seguramente, una plataforma flotante. Haya hecho usted su propia vela, la compre o fabrique una serie de ellas con distintas mechas, contemple las características de las llamas.

La llama más débil es una zona de

reacción y, por ello, sólo tiene luz azul. En una llama más fuerte la zona de carbón luminosa empieza encima de la zona de reacción o justo dentro de ésta y asciende hasta dividir en dos la zona de reacción. En una llama más alta, la zona azul de reacción está alrededor de la base y la parte alta de la zona de carbón luminosa está directamente expuesta al aire exterior. De hecho, la llama asciende tanto que la zona interior de la parte de carbón luminosa se enfría; así pues, las partículas de carbón ya no se consumen cuando alcanzan la parte alta de la llama y luego se liberan en forma de hollín.

Comprobé el espectro de mi vela con una rejilla de difracción de bajo coste y con un prisma de cristal. La zona de carbón luminosa dominaba la emisión de luz y vi un espectro completo desde el rojo al azul obscuro, sin ninguna apariencia de emisiones moleculares. Para ver la emisión del $C_2$ y el CH tuve que usar un espectrómetro del tipo de los que se emplean en las clases introductorias de física. La luz de la vela entraba por una estrecha ranura y era dirigida por una lente hacia la rejilla de difracción o al prisma, los cuales la desviaban y dispersaban mostrando distintos colores. El espectrómetro tenía un telescopio móvil con el cual se podía examinar la luz dispersada.

Cuando permití que la luz procedente de la zona luminosa de carbón entrara por la ranura, volví a ver de nuevo un espectro completo. Cuando permití que entrara por la ranura sólo la luz procedente de la zona azul de reacción de un lado de la llama, el espectro completo de las partículas incandescentes no era tan brillante y pude distinguir varias emisiones de moléculas. Una vez que descubrí las posiciones angulares de estas emisiones pude calibrar el espectro de colores en términos de longitudes de onda al quitar la vela y sustituirla por una lámpara de sodio, observando así las posiciones angulares de las emisiones del sodio. Las longitudes de onda de las emisiones de sodio aparecen en libros de consulta. Así pude identificar las emisiones moleculares procedentes del $C_2$ y CH calculando las longitudes de onda relacionadas con las posiciones angulares que yo había registrado y relacionándolas con otros trabajos que incluían las longitudes de onda procedentes de estas mismas moléculas.




*Diversos tipos de llamas*



*Espectros desde la emisión de una lámpara de sodio hasta la de la llama de una vela*

# Libros

## *La mecánica y energética muscular y la cerámica pintada del Mimbres*

Philip Morrison

MECHANICS AND ENERGETICS OF ANIMAL LOCOMOTION, edición a cargo de R. McN. Alexander y G. Goldspink, Halsted Press, John Wiley and Sons (37,50 dólares). PEDAL POWER: IN WORK, LEISURE, AND TRANSPORTATION, edición de James C. McCullagh. Rodale Press, Emmaus, Pennsylvania (4,95 dólares). Todo animal que se mueve posee dispositivos análogos a un motor, un sistema electrónico de control y un mecanismo dinámico para convertir la energía interna en el movimiento apropiado. Los trabajos realizados por el profesor Sir James Gray y su escuela expusieron hace dos décadas los problemas al respecto y revelaron con maña y precisión cómo las fuerzas que mueven a cada creatura proceden de su interacción con el entorno.

El libro *Mechanics and Energetics of Animal Locomotion* es un compendio, densamente abarrotado de resultados y breves análisis y prolífico en notas, del trabajo de un grupo de investigadores ingleses y estadounidenses, un amplio resumen de lo que sabemos. Nuestra perspectiva se funda en una comprensión mucho más profunda del músculo mismo, en grandes avances de la neurofisiología (especialmente, neurofisiología de los insectos), en mediciones fisiológicas posibilitadas por túneles aero o hidrodinámicos y en análisis de rendimientos y pruebas de campo realizados con un detalle digno de un proyecto de ingeniería cuantitativo.

El motor es, por supuesto, el músculo y su combustible ATP (salvo en cuanto a las rápidas contracciones de ciertos animales como los *Stentor,* en los cuales un potencial de calcio genera directamente la tensión). Se dedica un capítulo al intrincado diseño del músculo y sus relaciones entre fuerza y trabajo vistas en función de tasas y longitudes. Un segundo capítulo detalla los mecanismos moleculares del movimiento muscular y de su abastecimiento de combustible; un tercero pasa revista a la economía energética del motor primario. Hay un aspecto que es fundamental y vuelve a subrayarse: los músculos estirados mientras aún están contrayéndose (realizando trabajo negativo, como los de un hombre que camina escaleras abajo) consume mucho menos combustible. Esto lo demostró en cierta ocasión A. V. Hill ante la Royal Society. Una frágil mujer que pedaleaba para frenar resistía fácilmente a los mejores empeños de un "atleta varón, grande y saludable" que efectuaba el trabajo positivo sobre los ergómetros acoplados de ambos.

Esta observación es la clave de numerosos aspectos de los diseños de la naturaleza. Las alas de mosquito, batiendo velozmente, deberían consumir gran cantidad de trabajo negativo incluso a esta elevada tasa de descuento, pero unos goznes elásticos (hechos de un supercaucho proteínico especial) significan que no se efectúa tal trabajo. Las alas casi resuenan; los músculos no trabajan contra las fuerzas inerciales sino sólo contra el aire (y un tanto extra para compensar la falta de perfección total del material elástico). Ahora se conoce bastante bien la manera en que lo logran los controles neurales. Los músculos de las alas se contraen principalmente en respuesta a su propio estiramiento; unos impulsos neurónicos infrecuentes sirven tan sólo para mantenerlos en estado de activación. El salto del canguro exhibe análogos ahorros elásticos. El salto de la pulga es una hazaña catapultada por un muelle, tensado por una contracción muscular lenta y soltado de pronto. La fibra muscular no podría reaccionar con suficiente velocidad en una escala pulguil, aun cuando existen fibras musculares rápidas y lentas. Muchos músculos contienen más de un tipo de fibra, cada uno de los cuales alcanza su eficiencia máxima a una velocidad de contracción diferente "un sistema de dos o tres marchas, como quien dice".

El tipo de locomoción de la cucaracha se ha estudiado en detalle y se describe en la obra en el contexto de numerosas pautas de cuadrúpedos galopantes: factores funcionales de las varias patas, estabilidad y velocidades preferentes del cambio de la modalidad de marcha. Hasta existe un optimístico diagrama esquemático de la circuitería neural que podría corresponder a cada andadura, con una casilla de entrada denotada "Orden de caminar" (¿un pensamiento cucarachesco?).

Si el organismo camina, corre, trota, repta o excava, hay alguna descripción de su dinámica, y hecha pulcramente. Un cuidadoso tratamiento mecánico en términos adimensionales, realizado por R. McN. Alexander, de la Universidad de Leeds, nos ayuda a entender los efectos de escala. La natación (junto con el remo y la propulsión a chorro en el agua) se examina en profundidad; igual ocurre con el vuelo, desde el revoloteo suspendido, pasando por el planeo y vuelo a vela, hasta el aleteo rápido. Hay un informe de C. J. Pennycuick, con sus datos sobre los buitres y cigüeñas africanos, recogidos mientras el investigador y los pájaros andaban volando juntos bajo la misma nube del tipo cúmulo hace unos años. (El ocupaba un pequeño planeador motorizado.) Un moscardón encaja algo fuera de las curvas medias de revoloteo, con un rápido aleteo y alas pequeñas para su tamaño, pero no hay dudas sobre la base de su diseño de vuelo; lo comprendemos principalmente a partir del brillante trabajo del fallecido Torkel Weis-Fogh. (El profesor Alexander nos entrega los capítulos de repaso sobre vuelo y natación que Weis-Fogh no alcanzó a preparar.)

Los peces evitan irse a pique de tres maneras. Unas aletas del tipo hidrodinámico trabajan, siempre que estén nadando de modo continuo; compuestos de poca densidad, como el escualeno, pueden equilibrar el tejido más denso; una vejiga natatoria es –quizás– una mejor solución en cuanto a energía. Los nadadores lentos marchan de hecho mejor que los compuestos livianos y poco densos, pero la natación veloz favorece la solución de sustentación activa (todo ese volumen extra compensa la resistencia extra, que es grande a alta velocidad).

La vejiga con gas es lo mejor, pero mantenerla a la presión ambiente exige trabajo químico; sólo los grandes peces pueden permitirse el mantener una costosa burbuja de gas en las profundidades. El capítulo final se ocupa de células aisladas y su movimiento a través de un mundo pegajoso. El citoplasma amebiano plantea arduos problemas de reología, pero es allí en donde ha de buscarse el movimiento de estos "carnívoros lobulosos".

Esta obra es un ejemplo particular-

mente pulcro de la industria inglesa del libro, aunque es cara para su modesto tamaño. Contiene muchos dibujos; casi todas las demás ilustraciones son micrografías electrónicas. Es un rico yacimiento de física e ingeniería, y un mapa viario que conduce a una gran literatura de estupenda frescura e ingenio, dentro de la gran tradición de los fisiólogos de la época dorada de Bloomsbury.

Sólo *Homo sapiens* posee la rueda accionada por pedales, lo cual se celebra en *Pedal Power*. A David G. Wilson, ágil ingeniero mecánico del M.I.T., puede vérsele casi todos los días deslizándose por las calles de Cambridge en su bicicleta reclinable de su propio diseño (tiéndase y disfrute del viaje); Wilson dice que es segura, eficiente y cómoda. En esta obra leemos acerca de bicitaxis, bicicletas con botalones para apoyo sobre raíl, botes y tornos a pedal –todos ellos de antaño y modernos– y un nítido proyecto de bicicleta anclada de factura doméstica para motorizar tareas de cocina, taller y jardín (incluso un televisor) mientras uno se ejercita durante 20 minutos. El tema es el del título: ésta es la mejor manera de acoplar los músculos de la espalda y muslo humanos para producir energía de rotación útil a razón de un fácil décimo de caballo vapor o más para arrancadas y atletas.

La obra es práctica y a la vez filosófica, por no decir que es más bien exhortatoria. Ofrece información a muchos niveles, pero no ofende en absoluto al hombre económico sencillo. Podemos sacarle más partido al pedal, incluso allí donde el alimento es más caro que el petróleo. Stuart S. Wilson, de Oxford, expone maneras útiles de domeñar la potencia pedálica en el contexto del Tercer Mundo, en donde las redes eléctricas y refinerías están lejanas. "Quizá la bicicleta, esa máquina que nos hermana a todos, sea la interfase de unión entre Oriente y Occidente."

MIMBRES PAINTED POTTERY, por J. J. Brody, School of American Research, University of New Mexico Press (22,50 dólares). Como río, el Mimbres no es gran cosa. Nace entre picos volcánicos bien regados e intrincados, pero se seca al deambular hacia el sur, entrando en la llanura desértica cercana a Deming, en el suroeste de New Mexico, 50 kilómetros al norte de la frontera mexicana. A lo largo del Mimbres, desde su cauce inferior e intermitente ("otrora una región placentera aunque cálida") hasta las terrazas montañosas más frescas y verdes, se han hallado las ruinas de

unas 100 aldeas. Se componían de viviendas excavadas y complejos de adobe, que en los casos típicos alojaban unas docenas de familias de gente autosuficiente cuyo alimento básico era el maíz. Eran también cazadores y recolectores, expertos en "aprovechar plenamente la vida animal y vegetal que medraba en torno", desde el bisonte a la yuca, según lo ofreciera el ciclo anual.

Su época no es fácil de fijar, pero la fase Mimbres de las aldeas queda establecida mediante algunas dataciones de carbono y anillos de árbol y por asociación con objetos de greda para intercambio comercial, de datación conocida. Su estilo de cerámica pintada comenzó hacia el siglo X de nuestra era y continuó en pleno auge durante unos 200 años, desvaneciéndose con el abandono de los asentamientos del valle. Podemos seguir parcialmente los orígenes de esta gente a partir de las complejas influencias del milenio precedente a su época central, pero ignoramos por qué se fueron y podemos ver sólo vagamente sus huellas ulteriores al sur y al este del Mimbres. No los echó ni la sequía, ni la erosión ni la necesidad militar. Sus solares eran abiertos y alejados de refugios y no hay "señales de violencia en ningún yacimiento mimbres excavado hasta ahora". Al parecer, llevaban una vida tranquila, apacible y autónoma, pero no aislada.

Una docena de generaciones de artistas pintó los dibujos mimbres en negro sobre blanco, de ordinario sobre cuencos utilitarios, casi hemisféricos, de unos 25 centímetros de diámetro. Las vasijas se usaban para los alimentos y su preparación; las hacían en hornos de un solo uso, compuestos de 15 o 20 recipientes apilados con madera seca y encendida durante una o dos horas en descampado, soplada por un viento caprichoso, con lo cual pasaban de un estado reducido a otro oxidado. Los alfareros eran casi con certeza mujeres (por analogía con una difundida tradición), pero los pintores eran mujeres y hombres por igual. La cerámica es dura e impermeable. Era fácil de hacer, aunque de textura frágil. A los tiestos se les recubría con un fino caolín blanco extraído de unos pocos depósitos. Con un pincel diestramente masticado de yuca húmeda y lacia y una pasta negra obtenida moliendo los pedruscos de óxido de hierro de común ocurrencia en la zona, el pintor del Mimbres trabajaba con segura mano; borrar resultaba poco práctico.

Los primeros tiestos fueron descubiertos por personal destacado en campamentos del ejército estadounidense sito en esa tierra de apaches, al iniciarse este siglo. Los coleccionistas privados, y, finalmente, los arqueólogos profesionales, sacaron a la luz la cultura del Mimbres. En la segunda década del siglo ocurrieron las principales excavaciones y poco más en la siguiente. Al estar unas 1500 vasijas a salvo en museos, los intereses de los eruditos cambiaron. "Artefactos visual o emocionalmente potentes como las pinturas de los artistas del Mimbres podían distraer" a los estudiantes, que ahora buscaban yacimientos por las implicaciones universales que tuviesen.

Luego, en la década de 1960-69, el mercado se apoderó de Mimbres. Los marchantes neoyorkinos enviaron a sus exigentes agentes; los "huaqueros" locales dejaron los yacimientos sembrados de cráteres, y las palas mecánicas removieron la tierra día y noche. No es inverosímil la existencia de unas 10.000 vasijas pintadas, hoy en manos privadas y públicas, cuya procedencia es desconocida en la mayoría de los casos. Es el conocido cuento de "explotación de un recurso irremplazable por parte de intereses comerciales irresponsables y de la incapacidad de la comunidad científica" para actuar y proteger tal recurso. Los profesionales se contentaron con clamar "no excavarás" y perdieron la oportunidad de reclutar a los embelesados aficionados para poder proteger así los yacimientos. Los aficionados, despreciados, se convirtieron a su vez en saqueadores.

Los pintores del Mimbres dibujaron temas figurativos y no figurativos. Los diseños geométricos son, en su mayoría, lineales y tensamente organizados en la superficie del cacharro y, a menudo, "ópticos" en el sentido actual. Las líneas hacen un contraste lo bastante denso como para recargar la visión, con un equilibrio de tensiones binarios: "obscuro-claro, positivo-negativo, curvo-recto, dentro-fuera". (Los pintores de cerámicas de Acoma Pueblo aprovechan hoy intencionadamente ciertos modelos característicos de los artistas del Mimbres.)

Las mejores pinturas figurativas se adaptan a la simetría azimutal de un cuenco redondo, para crear un espacio pictórico a partir de múltiples figuras o de una ilusión de interacción que unifica la escena, míresela por donde se la mire, "pinturas con un equilibrio entre contenido y valores decorativos que está entre los más importantes jamás realizados por indígenas americanos durante la época precolombina".

Este hermoso volumen nos ofrece unas 150 vasijas en fotografías en blanco y negro (y una docena, más dos paisajes, en color), casi todas ellas realizadas con gran sensibilidad por Fred Stimson, incansable y afortunado turista de colecciones. El profesor Brody profundiza en la técnica de las pinturas de la cultura del Mimbres y en lo que podrían significar. Argumenta que, simplemente, no lo sabemos y los empeños por imputarles la calidad populachera y el encanto de unos cuantos símbolos de bandas guerreras, clanes o fábulas animales son tan sólo proyecciones de nuestras propias actitudes. Es poco lo que podemos decir, aunque podemos admirar la composición y la católica representación de lunas, hormigas-león y antílopes, y también el claro signo de mentes –no sólo manos y ojos– en actividad. A quien las contemple, le evocan algo las grandes pinturas rupestres de Europa, cuando distingue al armadillo con una máscara de cabeza de antílope o a un par de bailarines en trajes felinos, manos humanas y pies que aparecen bajo la cabeza y la piel.

La iconografía de Mesoamérica inclina a pensar que numerosos temas podrían referirse a la mitología de la muerte. La paradoja es más profunda que eso. Los artistas a tiempo parcial del Mimbres decoraron cantidad de cuencos. Los geométricos están a menudo manchados por un largo uso como recipientes para comida. No así los cacharros figurativos, los más de los cuales no fueron usados. Casi todas las vasijas que poseemos fueron ofrendas funerarias, "muertas" mediante la perforación de su fondo con una herramienta puntiaguda antes del entierro. Esta gente vivía cerca de sus difuntos; de entre 1009 entierros recuperados en las extensas ruinas de Swarts se hallaron más de 900 bajo habitaciones ocupadas, en pozos sin revestir, con ofrendas de cerámica, herramientas, turquesa o concha, raramente de alimentos.

Aquí se pone en tela de juicio gran parte de la arqueología, si seguimos la inquisición filosófica de este libro. ¿Cómo podemos desenterrar, decentemente, sin temblor, lo que unos artistas hace largo tiempo obviamente destinaron a permanecer para siempre bajo tierra? Los temas a debatir son profundos; dejémoslos entre Brody y su lector. Un reseñador sólo puede agregar que quienes forjaron aquello eran nuestros prójimos; en un mundo que se ha ampliado tantísimo quizá compartirían la alegría del Creador de contar con un auditorio admirativo e informado, por inesperado, por ignorante que sea.

# Bibliografía

*Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes;*


## ENERGIA NUCLEAR, ARMAS ATOMICAS Y ESTABILIDAD INTERNACIONAL

NUCLEAR POWER ISSUES AND CHOICES. Nuclear Energy Policy Study Group. Ballinger Publishing Company, 1977.

THE NATIONAL ENERGY PLAN. Executive Office of the President: Energy Policy and Planning. Government Printing Office, 29 de abril de 1977.

NUCLEAR PROLIFERATION AND SAFEGUARDS. Office of Technology Assessment, Congress of the United States, junio, 1977.

## LA ESTELA DE CELULAS EN MOVIMIENTO

COLD SPRING HARBOR CONFERENCES ON CELL PROLIFERATION, VOL. 3, BOOKS A, B AND C: CELL MOTILITY. Dirigido por R. D. Goldman, T. D. Pollard y J. L. Rosenbaum. Cold Spring Harbor Laboratory, 1976.

DAUGHTER 3T3 CELLS: ARE THEY MIRROR IMAGES OF EACH OTHER? Guenter Albrecht-Buehler en *The Journal of Cell Biology,* vol. 72; 595-603; 1977.

THE PHAGOKINETIC TRACKS OF 3T3 CELLS. Guenter Albrecht-Buehler en *Cell,* vol. 11, n.º 2, págs. 395-404; Junio, 1977.

## LOS INSECTOS DE LA SUPERFICIE DEL AGUA

COMMUNICATION BY SURFACE WAVES: MATING BEHAVIOR OF A WATER STRIDER (GERRIDAE). R. Stimson Wilcox en *Journal of Comparative Physiology,* vol. 80, págs. 255-266; 1972.

CAN *HALOBATES* DODGE NETS? II: BY MOONLIGHT? Lanna Cheng y James T. Enright en *Limnology and Oceanography,* vol. 18, págs. 666-669; 1973.

THE MECHANORECEPTIVE SYSTEM OF PREY LOCALIZATION IN *NOTONECTA,* II: THE PRINCIPLE OF PREY LOCALIZATION. Konrad Wiese en *Journal of Comparative Physiology,* vol. 92, págs. 317-325; 1974.

## EL NACIMIENTO DE ESTRELLAS DE GRAN MASA

SEVERAL H II REGIONS IN THE NEAR INFRARED. M. Beetz, H. Elässer, C. Poulakos y R. Weinberger en *Astronomy and Astrophysics,* vol. 50, n.º 1, págs. 41-46; 1 de julio de 1976.

SHOCK-DRIVEN IMPLOSION OF INTERSTELLAR GAS CLOUDS AND STAR FORMATION. Paul R. Woodward en *The Astrophysical Journal,* vol. 207, n.º 2, parte 1.ª, págs. 484-501; 15 de julio de 1976.

SEQUENTIAL FORMATION OF SUBGROUPS IN OB ASSOCIATIONS. Bruce G. Elmegreen y Charles J. Lada en *The Astrophysical Journal,* vol. 214, págs. 725-741; 1977.

## COMO COMPARTIAN SU ALIMENTO LOS HOMINIDOS PROTOHUMANOS

EARLIEST MAN AND ENVIRONMENTS IN THE LAKE RUDOLF BASIN: STRATIGRAPHY, PALEOECOLOGY AND EVOLUTION. Dirigido por Yves Coppens, F. C. Howell, Glynn Ll. Isaac y Richard E. F. Leakey. University of Chicago Press, 1976.

HUMANKIND EMERGING. Dirigido por Bernard G. Campbell. Little, Brown & Company, 1976.

HUMAN ORIGINS: LOUIS LEAKEY AND THE EAST AFRICAN EVIDENCE. Dirigido por Glynn Ll. Isaac y Elizabeth R. McCown. W. A. Benjamin, Inc., 1976.

## CIRUGIA MICROVASCULAR EN EL ICTUS CEREBRAL

EXPERIMENTAL AUGMENTATION OF REGIONAL CEREBRAL BLOOD FLOW BY MICROVASCULAR ANASTOMOSIS. Jack M. Fein y G. Molinari en *Journal of Neurosurgery,* vol. 41, págs. 421-426, 1974.

MICROVASCULAR ANASTOMOSIS FOR CEREBRAL ISCHEMIA. Dirigido por Jack M. Fein y O. H. Reichman. Springer-Verlag, en prensa.

MICROVASCULAR NEUROSURGERY-1977. Dirigido por Jack M. Fein. The C. V. Mosby Company, en prensa.

## CHIMENEAS DE KIMBERLITA

MODEL OF A KIMBERLITE PIPE. J. B. Hawthorne en *Physics and Chemistry of the Earth,* vol. 9, págs. 1-15; 1975.

SUB-CRATONIC CRUST AND UPPER MANTLE MODELS BASED ON XENOLITH SUITES IN KIMBERLITE AND NEPHELINITIC DIATREMES. John B. Dawson en *Journal of the Geological Society, London,* vol. 134, parte 2.ª, págs. 173-184; noviembre, 1977.

## ¿COMO SE SEGREGA LA INSULINA?

THE ROLE OF THE EXOCRINE PANCREAS IN THE STIMULATION OF INSULIN SECRETION BY INTESTINAL HORMONES. R. Goberna, R. D. Fussganger, S. Raptis, M. Telib y E. F. Pfeiffer en *Diabetologia,* 7, 68, 1971.

GASTROINTESTINAL HORMONES AND ISLET FUNCTION. XVI NOBEL SYMP. E. F. Pfeiffer, M. Frank, R. Fussganger, R. Goberna, M. Hinz y S. Raptis. Editado por E. Almquist y F. Wirsell, 1973.

ACTION OF B-HYDROXY BUTYRATE, ACETOACETATE AND PALMITATE ON THE INSULIN RELEASE IN THE PERFUSED ISOLATED RAT PANCREAS. R. Goberna, J. Tamarit, J. Osorio, R. Fussganger y E. F. Pfeiffer en *Horm. Metab. Res.,* 6, 256, 1974.

INSULIN II. Editado por A. Hasselblatt y F. Bruchhausen. Springer-Verlag 1975.

## JUEGOS MATEMATICOS

NOISE: SOURCES, CHARACTERIZATION, MEASUREMENT. A. van der Ziel. Prentice-Hall, 1970.

"1/F NOISE" IN MUSIC AND SPEECH. Richard F. Voss y John Clark en *Nature,* vol. 258, n.º 5533, págs. 317-318; 27 de noviembre de 1975.

"1/F NOISE" IN MUSIC: MUSIC FROM 1/F NOISE. Richard F. Voss y John Clark en *The Journal of the Acoustical Society of America,* vol. 63, n.º 1, págs. 258-263; enero, 1978.

## TALLER Y LABORATORIO

CREATIVE CANDLEMAKING: FROM THE SIMPLE BASIC CANDLE TO THE MOST INTRICATE SCULPTURAL FORM. Thelma R. Newman. Crown Publishers, Inc., 1972.

FLAMES: A STUDY IN MOLECULAR SPECTROSCOPY. Richard A. Ashby en *Journal of Chemical Education,* vol. 52, n.º 10, págs. 632-637; octubre, 1975.